

Resumen

El proyecto que se presenta a continuación tiene como objetivo principal el diseño conceptual de la instalación eléctrica de un kart de ocio, cuya fuente de energía sea únicamente la electricidad.

Para la consecución de este objetivo se ha realizado, en primer lugar, un estudio sobre el estado actual en el que se encuentran este tipo de vehículos. Después de una breve introducción al kart y un breve repaso a su historia, se abordarán aspectos como la implantación del kart eléctrico en España y Europa actualmente. Otro análisis necesario dentro de este bloque consistirá en realizar una búsqueda de las soluciones que ofrece la competencia, servirá para ver la tecnología utilizada hoy en día así como las prestaciones de este tipo de vehículos.

Durante esta etapa, también se ha realizado una visita al “Electric karting Salou” con el objetivo de recopilar datos e información útil para las siguientes etapas del proyecto.

Con parte de la información extraída de la visita y el análisis ya realizado sobre la competencia, se ha sido capaz de proponer una especificación de las características deseadas que deberá tener nuestro kart.

Llegados a este punto ya se podrá empezar a diseñar la instalación eléctrica. Aquí será necesario: determinar qué tipo de elementos deberán estar presentes en la instalación, escoger el modelo que mejor se ajuste a nuestros propósitos, decidir la mejor ubicación para estos dentro del kart y proponer un modelo de conexionado entre todos ellos.

Para poder llevar a cabo este diseño se realizará un simulador que permita observar la evolución dinámica del kart. Con éste, se realizarán diferentes análisis que permitirán: dimensionar gran parte de los elementos presentes en la instalación, determinar la mejor configuración de los controladores presentes en el kart y finalmente simular la dinámica del diseño del kart definitivo.

Finalmente, se hará tanto un estudio económico como un estudio sobre el impacto ambiental del prototipo final y se expondrán las conclusiones del proyecto.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. OBJETO, ALCANCE Y MOTIVACIÓN	5
1.1. Objeto	5
1.2. Alcance.....	5
1.3. Motivación	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Descripción general Kart	9
2.2. Historia del Karting	10
2.3. Implantación y aplicaciones del Karting en España	11
2.3.1. Kart convencional.....	11
2.3.2. Kart eléctrico	11
2.4. Estudio de la competencia	12
2.5. Legislación vigente	14
3. ESPECIFICACIÓN BÁSICA	15
4. DESCRIPCIÓN SOLUCIÓN PROPUESTA	16
4.1. Descripción del conjunto	16
4.1.1. Introducción	16
4.1.2. Solución propuesta	18
4.2. Descripción de las partes	21
4.2.1. Motor.....	22
4.2.2. Baterías.....	26
4.2.3. BMS	29
4.2.4. Controlador	33
4.2.5. Cargador	36
4.2.6. Acelerador y freno.....	37
4.2.7. Relés.....	38
4.2.8. Fusibles.....	40
4.2.9. Convertidores DC/DC	41
4.2.10. Derivación al chasis	42
5. ANALISIS EXPERIMENTAL	43
5.1. Objetivos.....	43
5.2. Trabajo experimental.....	44

5.2.1. Visita Karting Eléctrico	44
5.2.2. Realización simulador	51
6. ESTUDIO ECONÓMICO	71
7. IMPACTO AMBIENTAL	73
8. PLANIFICACIÓN	75
CONCLUSIONES	77
AGRADECIMIENTOS	78
BIBLIOGRAFÍA	79
Referencias bibliográficas	79
Bibliografía complementaria	80
ANEXOS	83
A.1 Curva funcionamiento motor	83
A.2 Especificaciones BMS	84
A.2.1 Módulos de celda	84
A.2.2 Unidad de control	85
A.3 Especificación controlador Kelly	88
A.4 Especificación Convertidor DC-DC TMR 6-4822WI	91
A.5 Diagrama instalación eléctrica	92

1. OBJETO, ALCANCE Y MOTIVACIÓN

1.1. Objeto

El objeto principal de este proyecto es la realización del diseño de la instalación eléctrica de un prototipo de kart eléctrico con fines recreativos. Esto implica el estudio y selección de los componentes presentes en la instalación, la determinación de su distribución e interconexión y, finalmente, la elección de una configuración óptima para los controladores que gobiernan el comportamiento del kart.

Este proyecto se complementa con el proyecto realizado por el compañero Carles Lancharro. En éste, se realiza el diseño de la parte mecánica del kart, poniendo énfasis en el diseño del chasis, el sistema de dirección y en el dimensionamiento del sistema de frenado. Con esto, se consigue completar el diseño de un kart eléctrico útil para aplicaciones recreativas.

1.2. Alcance

Para situar dicho proyecto en un contexto real se ha escogido la situación que se expone a continuación.

Se ha hecho el supuesto que el autor, junto con el compañero Carles Lancharro, forman parte de una ingeniería especializada en el sector de la automoción. Un día, una conocida marca de karts se pone en contacto con la ingeniería para transmitir su interés por incluir un kart eléctrico en su gama de modelos.

Posteriormente a una reunión se decide aceptar el proyecto. En dicha reunión se acuerda tratar los siguientes temas:

- Análisis de la situación del mercado de los karts y estudio del potencial presente en este nuevo concepto de kart.
- Necesidad de un proceso de familiarización con las tecnologías relacionadas tanto con los karts con movilidad eléctrica como con otros tipos de vehículos eléctricos presentes hoy en día.

- Elección, ubicación, conexión y configuración de todos los componentes que forman parte de la instalación eléctrica del vehículo.
- Simulación del prototipo final para verificar el cumplimiento de sus prestaciones físicas y dinámicas.

Con esto se ve que no se abordarán los siguientes temas:

- Evaluación exacta de los costes de fabricación del modelo
- Construcción de un prototipo
- Realización de un plan de industrialización y comercialización

Concretamente, para el diseño eléctrico y electrónico se realizará:

- Selección de todos los componentes en base al cumplimiento de las especificaciones deseadas y a los modelos de estos componentes presentes en el mercado.
- Propuesta de conexionado de todos los elementos de la instalación eléctrica.
- Estudio de la mejor configuración del controlador para optimizar el uso de la frenada regenerativa.
- Realización de un simulador que permita parametrizar la respuesta dinámica del vehículo.

Por lo tanto, en este diseño no se ha contemplado:

- Realizar modificaciones y mejoras en los componentes existentes en el mercado.
- Levantar esquemas de potencia de cada uno de los componentes
- Metraje de los cables utilizados en la instalación eléctrica.

1.3. Motivación

Han sido diversos los motivos y factores que han empujado a realizar este proyecto sobre el diseño de un kart eléctrico.

Somos dos estudiantes y amigos que nos hemos conocido durante la carrera y que sienten un gran interés en el mundo de la automoción. Con esto, la idea de terminar el grado realizando un trabajo juntos sobre el mundo de la automoción, nos parecía una idea muy atractiva.

El hecho de trabajar juntos implicaba poner en práctica una de las competencias básicas en las que debe desenvolverse un ingeniero, el trabajo en equipo. Otra razón de tipo docente que motivaba la realización de este proyecto era el gran número de tecnologías y conceptos teóricos necesarios para el diseño de este tipo de vehículos, lo que permitiría poner en práctica gran parte de los conocimientos adquiridos durante el grado.

Concretamente, el hecho de elegir la energía eléctrica como método de impulsión del vehículo, venía motivado por dos razones estrechamente relacionadas. Estas consisten en el aumento de la concienciación social en el cuidado del medio ambiente y en la necesidad de reducir el impacto del hombre sobre éste. Esto, provoca que el estudio de automóviles con métodos de propulsión alternativos a la combustión sea cada vez más importante y que la expansión de este tipo de vehículos en el mercado sea cada vez más prometedora.

2. ESTADO DEL ARTE

Aun siendo ampliamente conocido el concepto de kart, se hace necesario introducir una breve descripción del mismo, así como el proceso de transformación que han sufrido al largo de los años.

Desde el punto de vista de desarrollo de cualquier producto es importante conocer aspectos como: su implantación en el mercado, sus posibles aplicaciones, las especificaciones y prestaciones actuales de productos similares o la existencia de algún tipo de legislación específica que regule dicho tipo de productos.

2.1. Descripción general Kart

Como concepto general, el kart es un vehículo terrestre, mayormente monoplaça, compuesto por cuatro ruedas, con apenas carrocería y el cual no dispone de suspensión.



Fig.1: Modelo RTX de la firma SodiKart [1]

La gran mayoría de los karts son impulsados a través de sus ruedas traseras gracias a la acción de un motor, el cual puede ser de gasolina o, como el caso que nos ocupa, eléctrico. Las ruedas delanteras se reservan para la dirección del kart, el cual no dispone de un mecanismo diferencial como los vehículos convencionales, lo que genera los ya conocidos derrapes en este tipo de vehículos.

El manejo por parte del usuario está únicamente sujeto a la acción de dos pedales (acelerador y freno) y un volante con ratio de giro pequeño. Este fácil manejo los hace ideales para aplicaciones de ocio y competición, siempre en circuitos especializados para acoger este tipo de vehículos.

2.2. Historia del Karting

Se cree que el conocido “Karting” empezó en la década de los 50 en una base aérea de Estados Unidos. El primer kart fue construido a base de piezas reaprovechadas de un avión así como de un motor de una cortacésped como método de propulsión, éste no superaba los 50 km/h.

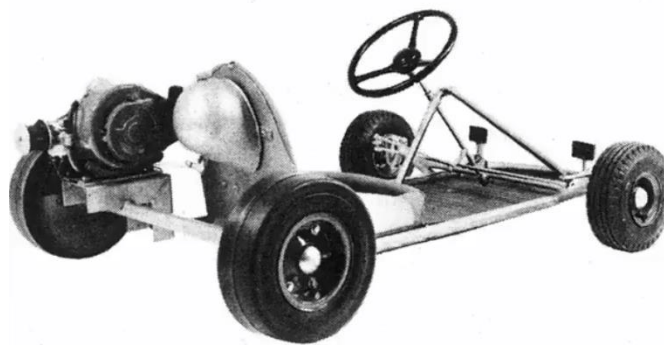


Fig.2: Modelo de los primeros karts [2]

Pronto se empezó a popularizar esta práctica entre las diferentes bases aéreas de Estados Unidos, hasta que en los años sesenta aterrizó en Europa, sobretodo irrumpió con fuerza en Inglaterra y Francia. Es en esta época cuando la FIA (Federación Internacional de Automovilismo) crea la CIK (Comisión Internacional de Karting). No sería hasta los años setenta que el karting llegaría a España.

Con la evolución de la tecnología los karts han ido mejorando sus prestaciones a lo largo de los años, donde estos han llegado a alcanzar velocidades cercanas a los 200 km/h. Con esta mejora en las diferentes tecnologías también surgieron los karts impulsados por motores eléctricos, objeto de nuestro estudio, los cuales han tenido su expansión más fuerte en esta última década, creándose múltiples kartings por todo el mundo exclusivamente para karts de esta nueva modalidad.

Aun así, los karts eléctricos aún tienen poca implantación en España dónde solo existen dos kartings de este tipo, el primero de los cuales se instaló en Salou el año 2013. Prueba de esta poca implantación en España se hace también visible en el hecho que todavía no exista una legislación específica que regule el uso de este tipo de vehículos.

2.3. Implantación y aplicaciones del Karting en España

Si bien el proyecto que nos ocupa trata en especial de esos karts puramente eléctricos, es conveniente tener una visión global de la implantación del karting en España, separando y comparando los diferentes usos y aplicaciones de los karts, ya utilicen como fuente de energía la gasolina o la electricidad.

2.3.1. Kart convencional

Los karts convencionales son los más utilizados en España hoy en día, estos cuentan con más de 70 circuitos repartidos por todo el país donde practicar esta modalidad.

Además la RFEDA (Real Federación Española de Automovilismo) cuenta con una regulación propia para este tipo de vehículos así como de un campeonato propio, el “Campeonato de España de Karting”.

Dicho campeonato cuenta con una serie de categorías diferenciadas, las cuales engloban desde los karts menos potentes para los pilotos más jóvenes (Alevines) hasta los karts más potentes para los pilotos más experimentados (Categoría KZ-2).

El karting es bien conocido por ser entre otras, la modalidad donde gran parte de los pilotos de las máximas competiciones automovilísticas del mundo, como la F1, tienen sus inicios. Es un ejemplo el famoso piloto español de Fórmula 1 Fernando Alonso, cuatro veces campeón del Campeonato Junior de karting de España.

Con esto, se muestra la gran implantación del karting “convencional” en España. Esta fuerte implantación también está presente en el resto del mundo, dónde la CIK regula toda la reglamentación, legislación y competiciones de este tipo de vehículos.

2.3.2. Kart eléctrico

Contrariamente a lo que sucede con los karts “convencionales”, este nuevo tipo de karts no ha tenido, por el momento, tanta aceptación. Prueba de esto, como ya se ha comentado, es el hecho que en España solo existan dos kartings que albergan este tipo de vehículos (Salou y Palma de Mallorca).

Otro indicio de esta poca implantación en nuestro país radica en el hecho de que no hay un organismo que se encargue específicamente de la regulación de los karts eléctricos, tanto

para usos exclusivamente de ocio como competición, ya que la RFEDA no los contempla en su reglamentación.

Para encontrar algún tipo de reglamentación o legislación que regule el uso de este tipo de vehículos hay que ir al “Campeonato de Vehículos de Propulsión Alternativa” que organiza la FIA. Es aquí donde encontramos una categoría dedicada exclusivamente a los karts propulsados por energía eléctrica. Esta reglamentación se explicará más en profundidad en el apartado “2.5 Legislación vigente”.

Aun siendo todavía poco presentes, los karts eléctricos se van popularizando cada vez más entre otros países europeos como Francia, Suiza e Italia, los cuales ya cuentan con 24, 9 y 13 kartings eléctricos respectivamente.

Otra prueba de esto es el nacimiento en 2014 de la fórmula E, un campeonato similar al de Fórmula 1 pero donde los monoplazas son impulsados exclusivamente por energía eléctrica. Con este campeonato se pretende popularizar el uso de este tipo de vehículos a la vez que sirve para investigar en el desarrollo de nuevas tecnologías.

Así pues, aun siendo un mercado débil en nuestro país, esta alternativa se está implementando con fuerza en el resto de Europa, donde se está estableciendo un mercado potencial para este tipo de karts.

2.4. Estudio de la competencia

Como en todo proceso de diseño de un producto se hace necesario evaluar y analizar los productos de la misma familia existentes hoy en día en el mercado.

Este estudio resultará útil para tener una visión global de las compañías presentes en el mercado, las tecnologías aplicadas por estas compañías en los productos y las prestaciones que ofrecen estos al usuario, entre otras.

En este caso en particular se pretendía obtener información sobre: fabricantes de karts eléctricos, componentes y tecnología utilizada, características físicas (dimensiones y peso) y prestaciones (velocidad, aceleración y autonomía).

Para obtener esta información se realizó una primera búsqueda por internet para ver que compañías aparecían y analizar las características de los karts que ofrecían.

Después de esta búsqueda se resumió la información obtenida en la siguiente tabla.

Modelo	Fabricante	Tipo motor	Potencia motor (kW)	Tipo batería	Prestaciones batería (volts/capacidad)	Peso (kg)	Dimensiones (mm) (longitud, anchura, altura)
SLC	Speed2Max	AC	17	Plomo	12v/48Ah	200	2100x1350x800
ECOVOLT NG	BIZ Karts	DC (sin escobillas)	14,8	LiFePO4	51,2v/3kWh	200	1900x1310x600
STINGER	Caroli kart	DC (con escobillas)	5,5	LiFePO4	48v/60Ah	195	1920x1300x600
SINUS ion	Rimo	DC (con escobillas)	2x2,8	LiFeMnPO4	16x3,2v/60Ah	170	2020x1390x600
STORM	Otl kart	AC	4-8	Plomo	4x12v	180	2060x1410x600
F1	Tom KART	DC (con escobillas)	16	Li-Ion	50v/40Ah	150	1950x1300x650



Fig.3: Modelo SINUS ion (Rimo) [3]



Fig.4: Modelo ECOVOLT NG (BIZ Karts) [4]

Como ya se verá más adelante, el modelo ECOVOLT NG es el utilizado en el “Electric Karting Salou”.

En la tabla, ya se puede ver cómo, mientras las dimensiones y el peso de los karts toman valores similares en todos los modelos analizados, el elemento motor y las baterías presentan características muy distintas. Se encuentran desde motores operando con corriente alterna (AC) a motores de corriente continua (DC) y baterías tan distintas como son las hechas a partir de plomo o las que su elemento principal es el Litio.

Sin embargo, estas compañías no ofrecían datos referentes a las prestaciones de los vehículos en cuanto a: velocidad, aceleración y autonomía. Por este motivo, entre otros, se realizó una visita a un karting operado exclusivamente por karts eléctricos.

Como se detalla en el apartado experimental, de esta visita y su posterior análisis se extraen los siguientes datos de interés.

Aunque el km/h no es unidad del sistema internacional, se utiliza por ser la forma en que se expresa comúnmente la velocidad. La unidad del sistema internacional equivalente es el m/s.

Kart utilizado	Velocidad máxima permitida karts	Velocidad máxima alcanzada circuito	Aceleración máxima alcanzada circuito	Autonomía
Eco Volt (BIZ Karts)	70 km/h	46 km/h	4,68 m/s ²	40 min

Con esto, ya se puede tener una idea aproximada de las prestaciones actuales de este tipo de karts.

2.5. Legislación vigente

Como se ha mencionado repetidamente, actualmente en España no existe, o no se ha encontrado, ninguna ley que regule específicamente el uso ni construcción de este tipo de vehículos, siempre que se usen en un circuito especialmente adaptado para ellos. Esto quiere decir que no se estará sujeto a prácticamente ninguna restricción que limite el diseño.

Una restricción que si hay que cumplir, la cual es común a gran parte de los productos comercializados dedicados a la industria y a los servicios, es que todos los componentes que configuran el kart deben estar dotados de la marca CE¹ ("*Conformité Européenne*").

Otro punto a tener en cuenta es que la FIA organiza diferentes campeonatos para vehículos de propulsión alternativa. En la categoría V de esta competición encontramos a lo que se refiere como "Electric single-seaters (go-karts)" la cual se refiere a los karts eléctricos. En estos campeonatos sí que se encuentra una reglamentación que regula el uso de estos vehículos, se puede consultar dicha reglamentación en el siguiente link:

<http://www.fia.com/regulations/regulation/fia-alternative-energies-cup-99>

Desde el punto de vista eléctrico, dicha regulación se encarga de controlar aspectos relacionados con: las tecnologías de baterías permitidas, las metodologías de carga de las baterías y, fundamentalmente, los elementos de seguridad y protección requeridos en la instalación eléctrica.

Así, aun siendo conscientes que esta última reglamentación no es de obligado cumplimiento para nuestra aplicación del kart como vehículo de ocio, se estudiará y se adoptarán algunos de los criterios descritos en ella para el diseño del kart.

¹ Marca CE: Certificado que garantiza que el producto cumple unos requisitos mínimos de seguridad establecidos por la Unión Europea.

3. ESPECIFICACIÓN BÁSICA

Una vez realizado un estudio del estado en el que se encuentran hoy en día este tipo de vehículos, se propondrá una especificación donde se fijarán unos ciertos objetivos cualitativos y cuantitativos, tanto de diseño como de prestaciones, que deberá seguir el prototipo final.

Se resumirá dicha especificación en una tabla que contendrá las siguientes columnas:

- **Parámetro:** Descripción del parámetro/objetivo a especificar
- **Valor deseado:** Valor o estado deseado, del parámetro en cuestión, en el prototipo final.
- **Valor límite:** El valor del parámetro en el prototipo final no debe ser peor que dicho límite.
- **Justificación:** Breve justificación de los valores anteriormente presentados.

Parámetro	Valor deseado	Valor límite	Justificación
Peso	150 kg	200 kg	Valores máximo y mínimos de los karts de la competencia
Velocidad máxima	70 km/h	70-50 km/h	<u>Valor deseado:</u> valor máximo permitido en un karting <u>Valor límite:</u> límite superior marcado por la velocidad máxima permitida. Límite inferior fijado a partir de las prestaciones del kart de Salou
Aceleración máxima	6 m/s ²	4 m/s ²	<u>Valor deseado:</u> valor que mejora en un 30% la aceleración del kart de Salou <u>Valor límite:</u> valor ligeramente inferior al del kart de Salou
Autonomía	45 minutos	20 minutos	<u>Valor deseado:</u> mejorar en un 12,5 % la autonomía del kart de Salou <u>Valor límite:</u> valor que se ha considerado aceptable para el uso que se les da a los karts (tandas 10/15min)
Productos tóxicos	NO	NO	Al haber pensado ya en un kart eléctrico como una alternativa beneficiosa para el medio ambiente, se quiere completar esta filosofía evitando el uso de cualquier producto tóxico.

4. DESCRIPCIÓN SOLUCIÓN PROPUESTA

En este apartado se tratará de describir uno de los objetivos principales del trabajo, el diseño de la instalación eléctrica del kart, así como la determinación de todos sus componentes. Entendiendo por estos componentes todos aquellos elementos que: suministran, consumen o controlan la energía eléctrica.

Para abordar este objetivo y para hacerlo más comprensible se ha dividido este apartado en dos subapartados:

- Descripción del conjunto: Se dará una visión global del conjunto de la solución. Se presentarán todos los elementos que conforman la instalación eléctrica, su situación y sus conexiones con el resto de elementos.
- Descripción de las partes: Se describirán todas las partes que forman el conjunto por separado. Se profundizará en el papel que desarrollan dentro de la instalación, se justificará su elección y se resumirá su funcionamiento.

4.1. Descripción del conjunto

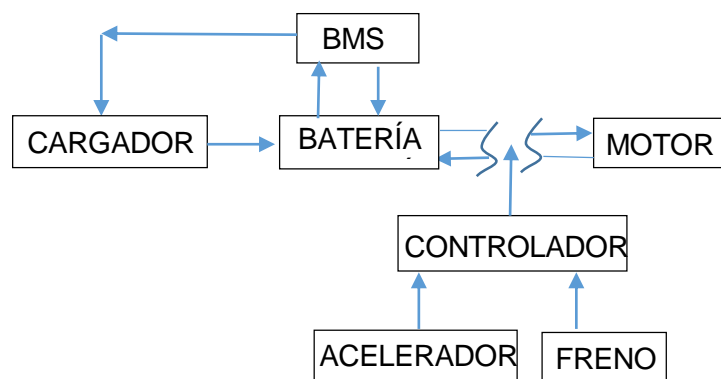
Como se ha comentado, este apartado trata de dar una visión global de la solución. Es decir, abordará la solución en todo su conjunto, viendo todos los elementos que conforman la instalación eléctrica. Con esto, se resumirá brevemente el proceso que se lleva a cabo para acabar suministrando la energía eléctrica necesaria al motor.

Además, se mostrará sobre un esquema, dónde estos componentes han sido situados y qué criterios se han seguido para decidir esta ubicación final. Finalmente se verá un diagrama donde se aprecian todas las conexiones entre los diferentes elementos de la instalación.

4.1.1. Introducción

El objetivo principal de la instalación eléctrica del kart es, en definitiva, almacenar y controlar la dosificación de una cierta energía eléctrica al motor (intensidad y voltaje) para que éste la transforme en energía mecánica. La cantidad de energía eléctrica suministrada al motor depende esencialmente del grado de presión que se ejerce sobre el pedal del acelerador. Para lo que puede parecer un objetivo sencillo, intervienen un gran número de elementos.

Para tener una mayor visión de cómo se desarrolla internamente este proceso y que elementos principales lo configuran, se presenta el siguiente esquema de bloques.



En este esquema se representa:

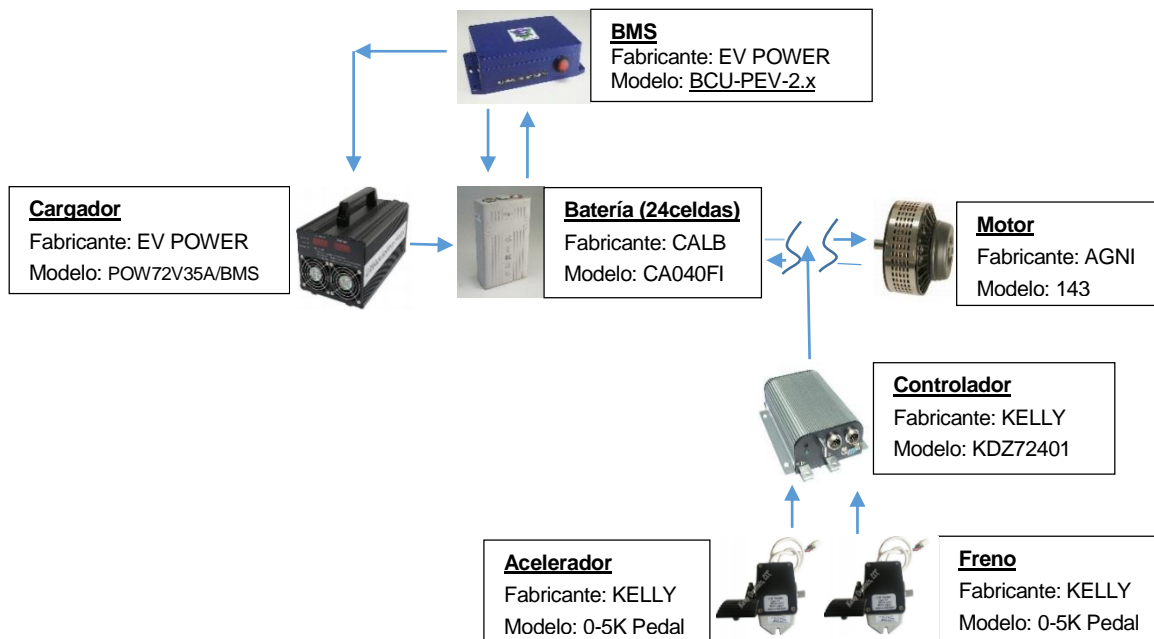
1. Las **baterías** aplican un cierto voltaje al **motor**. Este voltaje no es el voltaje de las baterías en su totalidad sino que éste es recortado por la acción de un **controlador**. El doble sentido de la flecha simboliza que en ciertas circunstancias el motor puede actuar como generador y suministrar energía a las baterías (este proceso es conocido como regeneración).
2. La acción de dicho controlador está gobernada en gran parte por la acción del pedal del **acelerador** y el **freno**. Como se verá se utilizarán potenciómetros para traducir la presión sobre los pedales en señales eléctrica interpretables por el controlador.
3. El **BMS** (battery management system) es un sistema de gestión de la batería, necesario para evitar sobrecargas y sobredescargas en las baterías de tipo LiFePO₄. El doble sentido simboliza por una parte la recogida de datos sobre el estado de las baterías y por otro la acción del BMS sobre ellas.
4. El **cargador** se encarga de recargar las baterías a partir de la red eléctrica. La influencia del BMS sobre el proceso de carga simboliza que éste es capaz de controlarlo e incluso interrumpirlo si llega a ser necesario.

Como se mostrará más adelante, hay otros elementos menos complejos pero también importantes, que intervienen en este proceso. Es el caso de: relés, fusibles, convertidores DC/DC y derivaciones al chasis.

4.1.2. Solución propuesta

Se presentará ahora, en primer lugar, los elementos principales escogidos para formar parte de la instalación eléctrica de nuestro kart.

Para esto, se presenta a continuación un esquema como el del apartado anterior pero dónde se muestra la imagen del elemento, su fabricante y el modelo seleccionado.



En segundo lugar, la solución pasa por diseñar un modelo de conexionado de todos estos elementos. Aquí, se necesitarán otros elementos que protejan y controlen el paso de la corriente eléctrica por el circuito.

Siguiendo la filosofía anterior, se presenta, en primer lugar, el esquema de conexionado de la instalación eléctrica del kart completa². En segundo lugar, se procederá a detallar y justificar la ubicación de los componentes así como a explicar el funcionamiento de la instalación a partir del diagrama.

² En el anexo A.5 se presentan imágenes ampliadas del esquema para poder ver con mayor detalle todos los elementos y sus conexiones.

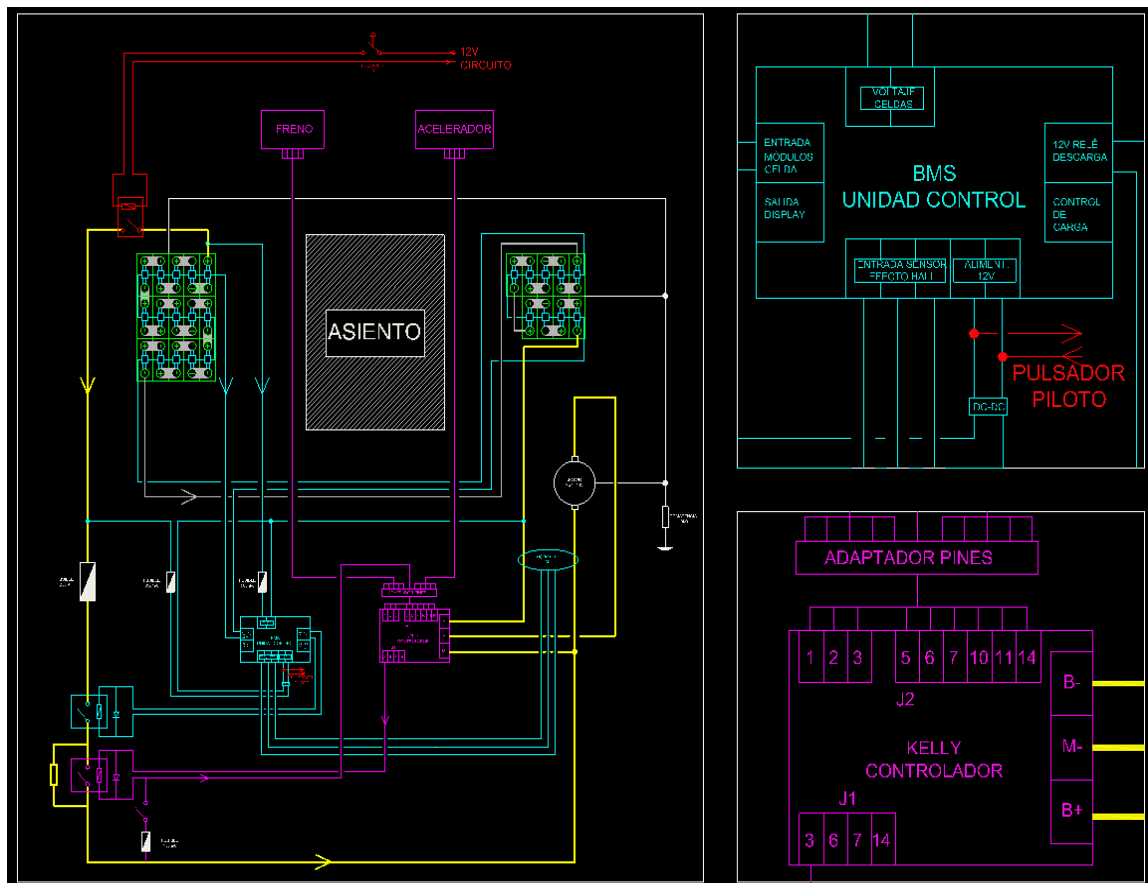


Fig.5: Diagrama conexión instalación eléctrica

En este esquema, ya se puede apreciar la distribución en el kart de todos los elementos que conforman la instalación eléctrica (cogiendo el asiento de éste como ubicación de referencia). Así pues, se ve:

- Las 24 celdas de las baterías están conectadas en serie y distribuidas en dos bloques de 16 y 8 celdas, situados en los laterales izquierdo y derecho del piloto respectivamente.
- El motor está ubicado justo por detrás del bloque de 8 celdas de batería, a la derecha del piloto.
- El emplazamiento del BMS y el controlador está justo detrás del piloto.

- Los pedales de acelerador y freno están situados, como es común, al alcance de los pies del piloto.

La ubicación de estos componentes se ha realizado conjuntamente con el compañero Carles Lancharro, encargado de diseñar la parte mecánica del vehículo. Así, se ha determinado la ubicación de los componentes en base a criterios tanto eléctricos (comodidad al hacer las conexiones, necesidad de refrigeración de los componentes) como mecánicos (aprovechamiento del espacio existente, estabilidad y repartimiento de cargas en el vehículo y ergonomía tanto del conductor como de los mecánicos).

A continuación, se muestra una imagen en planta del kart, perteneciente a Carles Lancharro, donde se aprecia esta distribución de componentes.

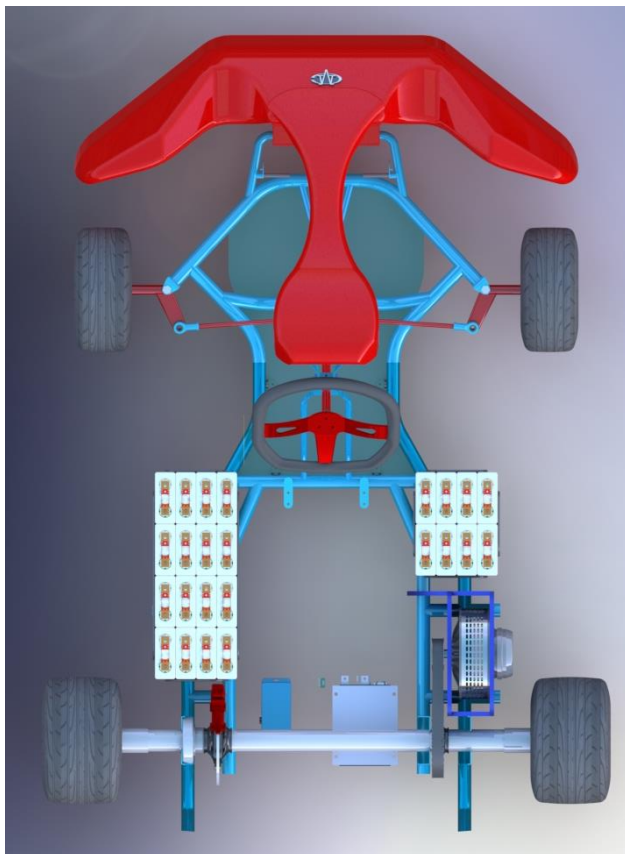


Fig.6: Imagen en planta del kart. Distribución de componentes. (Autor: Carles Lancharro)

En cuanto al funcionamiento más general de esta instalación se aprecia como:

1. Existe un pulsador (color rojo), al alcance del piloto, que permite abrir o cerrar al instante el paso de corriente por el circuito.
2. Las baterías suministran la potencia al motor (cables amarillos) pero esta está sujeta a la acción de controlador KELLY (color magenta).
3. El controlador KELLY registra la acción de los pedales acelerador y freno (cables magenta). Este presenta una salida capaz de interrumpir el paso de corriente por el circuito.
4. El BMS registra los datos de las baterías y otros sensores (cables cian) y actúa cortando la alimentación al motor si es necesario.

La explicación del funcionamiento detallado de estos elementos junto con el de los elementos secundarios de protección y control se ampliará en el apartado “Descripción de las partes”.

4.2. Descripción de las partes

En este apartado se desglosará el conjunto de la instalación eléctrica en cada una de sus partes y se tratará de:

1. Explicar el propósito del elemento
2. Justificar la elección del modelo escogido
3. Explicar su funcionamiento detallado

Se empezará por describir aquellos elementos más complejos presentes en la instalación. Éstos son:

1. Motor
2. Baterías
3. BMS
4. Controlador
5. Cargador
6. Acelerador y freno

4.2.1. Motor

El motor es el elemento principal de la instalación eléctrica, ya que es el encargado de transformar la energía eléctrica proveniente de las baterías en energía mecánica. Por este motivo, se le dedicará especial atención tanto a su funcionamiento como a la justificación de la elección escogida.

Funcionamiento del motor eléctrico

En general, el interior un motor eléctrico se presenta como:

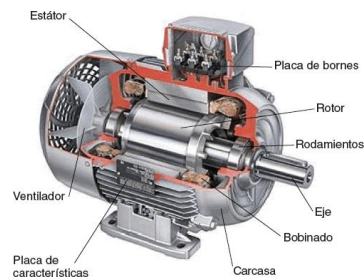


Fig.7: Representación partes motor [5]

Dónde, resumidamente, su principio de funcionamiento general es el siguiente:

- El estator, parte exterior y fija del motor, se encarga de crear un campo magnético en el interior (B).
- En el interior de este campo magnético se encuentra el rotor, por el cual circula una cierta corriente eléctrica (I).

Según la Ley de Lorenz, un campo magnético (B) atravesado por una partícula sometida a un campo eléctrico (I), genera una cierta fuerza (F) sobre esta partícula.

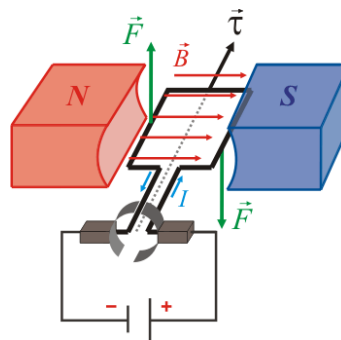


Fig.8: Representación de la Ley de Lorenz [6]

Con esto, se ve que debido a la corriente que circula por el rotor (I) junto con la acción del campo magnético (B) generado por el estator, se producirá una fuerza (F) sobre el rotor que hará que éste gire en un determinado sentido.

La fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula de carga q se define como:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Donde \vec{v} es la velocidad de la carga q y \vec{B} es la intensidad del campo magnético que la atraviesa.

- El sentido de giro se puede determinar con una sencilla regla conocida comúnmente como “La regla de la mano derecha”. Aunque no se detallará dicha regla, basta con decir que será necesario conmutar el sentido de la corriente que circula por el estator cada media vuelta, para que éste siga girando en el mismo sentido.

Clasificación motores eléctricos

Por su complejidad, los motores eléctricos permiten un gran número de configuraciones diferentes. A continuación se describirán algunas de las formas en que se dividen los motores eléctricos. La primera de ellas es:

- Según la corriente que circula a través de ellos: Según la corriente de trabajo del motor, se tienen motores que trabajan con corriente continua (DC) o con corriente alterna (AC).

Otra clasificación posible consiste en clasificar los motores según:

- El tipo de estator: Se distinguen dos casos principales:
 - Estator bobinado (excitados): El estator está formado por una serie de devanados que crearan un campo magnético cuando circule corriente por ellos.
 - Imanes permanentes: El estator consta de imanes permanentes que generan el campo magnético por su propia naturaleza (no hace falta excitarlos).

Finalmente distinguiremos entre diferentes tipos de motores eléctricos según:

- Método de conmutación de la corriente: Existen varios métodos para conmutar el sentido de la corriente que circula por el rotor. Los métodos principales consisten en:
 - Conmutación mediante escobillas: Conmutación mecánica a través de unos elementos presentes en el motor llamados escobillas.
 - Conmutación electrónica (sin escobillas): La conmutación se realiza de forma electrónica mediante un sistema de control especial.

Solución propuesta

Al analizar detenidamente las diversas clasificaciones para los motores eléctricos se ha determinado que la configuración óptima para nuestro motor es:

Criterio	Elección	Justificación
Corriente que circula por el motor	Corriente continua (DC)	Las baterías suministran corriente continua
Tipo de estator	Imanes permanentes	Más pequeños, fiables y eficientes que los excitados
Tipo de conmutación	Escobillas	Método más sencillo (aunque requiera de mantenimientos periódicos), barato y evita implementar sistemas de control complejos adicionales

Así pues, se busca un motor eléctrico de: corriente continua, imanes permanentes y con escobillas.

Dada la gran presencia de este tipo de motores en el mercado, se ha realizado un estudio para determinar cuál de ellos se ajusta mejor a las especificaciones deseadas para el kart. Dicho estudio se detalla en el apartado “6.2.2.4.2. *Análisis del comportamiento del kart al variar el motor y relación transmisión*” dentro del bloque “Análisis experimental”.

En este análisis se han comparado varios modelos de motor de fabricantes diversos. Concretamente, se han comparado motores de las firmas: AGNI, Lynch y Motenergy.

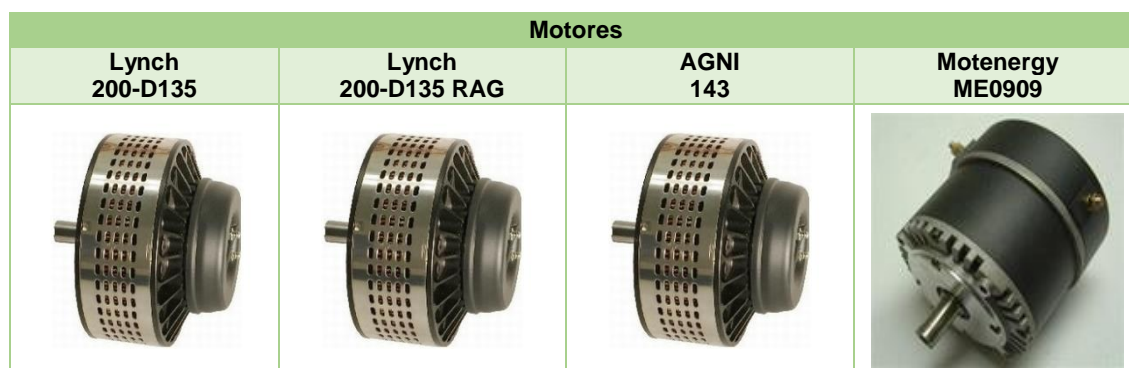


Fig.9: Imágenes motores Lynch, AGNI y Motenergy. [6] [7]

Nótese que no se aprecian diferencias visuales entre los motores Lynch y AGNI, esto es así porque el creador de los motores Lynch (Cedric Lynch) se unió a la firma AGNI en 2002.

Al finalizar el análisis, se llega a la conclusión que la mejor opción, de las analizadas, es el motor **143** de la firma **AGNI**.

Característica	Valor
Voltaje	72 V
Constante velocidad	47 rpm/v
Constante de par	0,2031 (N·m)/A
Intensidad máxima	400 A
Eficiencia aproximada	90%

Aun siendo la intensidad máxima 400 A, esta se limitará, mediante el controlador, a tan solo 300 A. Esta decisión se basa en garantizar una mayor seguridad, al rebajar la corriente máxima que circulará por la instalación. Al limitar la intensidad del motor se reduce ligeramente la aceleración máxima alcanzada por éstos, cosa que puede llegar a ser beneficiosa para los usuarios, dado que estos no serán pilotos experimentados. (Curva de funcionamiento del motor AGNI 143 presente en el anexo A.1)

4.2.2. Baterías

Las baterías son los elementos encargados de almacenar la energía eléctrica proveniente de la red y suministrarla al motor controladamente según se demande.

Tipos de tecnologías de baterías

Existen muchas tecnologías diversas de baterías con propiedades muy distintas. La FIA (Federación Internacional de Automovilismo) autoriza el uso de varias de estas tecnologías (aunque muchas no son recomendables), las cuales, junto con sus características, se detallan en la siguiente tabla.

Tipo	Símbolo	Energía específica [Wh/Kg]	Ciclos de vida	Voltaje celdas	Fabricantes	Comentarios
Plomo ácido	Pb/Acid	33-42	500-800	2	EXIDE OPTIMA	Productos tóxicos
Nickel-Metal Hydride	Ni/MH	60-120	500-2000	1.2	POWER SONIC TENERGY	No soportan bien las elevadas temperaturas Ni sobrecargas
Nickel-Iron	Ni/Fe	19-25	No depende	1.2		Baja Eficiencia
Lithium-Ion	Li/Ion	100-265	400-1200	3.4-3.7	TENERGY	No soportan bien sobrecargas ni sobredescargas Necesidad uso de controladores de batería En caso de sobrcargas pueden llegar a inflamarse
Lithium-Polymer	Li/Po	100-265	400-1200	3.4-3.7	TENERGY	No soportan bien sobrecargas ni sobredescargas Necesidad uso de controladores de batería En caso de sobrcargas pueden llegar a inflamarse
Lithium-Iron-Phosphate	LiFePO4	90-110	2000	3.2	PING BATTERIES SMART BATTERY TENERGY CALB	No soportan bien sobrecargas ni sobredescargas Necesidad uso de controladores de batería Voltaje más constante durante la descarga Más seguras que las otras baterías de litio

Analizando dicha tabla se puede deducir que las mejores candidatas son aquellas hechas a base de Litio, ya que:

- Presentan una energía específica muy superior. Lo que reduce considerablemente el peso de las baterías.
- Presentan una gran durabilidad (ciclos de vida). Altos valores de ciclos de carga y descarga.
- Contienen altos voltajes por celda. Valores altos de voltaje por cada celda de batería, lo que reduce el número de celdas necesarias para alcanzar un cierto voltaje.
- No presentan productos tóxicos.

Sin embargo, presenta un inconveniente, es necesario el uso de un dispositivo que regule la carga y descarga de estas, ya que no soportan bien sobrecargas ni sobredescargas. Esto se soluciona con un sistema de gestión de batería o BMS.

Conexión baterías

Para dimensionar las baterías es importante tener presente cómo las celdas estarán conectadas entre sí. La forma en que estas estén conectadas influirá en el valor final de voltaje y capacidad de todo el conjunto. Las celdas se pueden conectar de dos maneras:

- Serie: El polo positivo de una batería se conecta con el negativo de la siguiente y así sucesivamente.

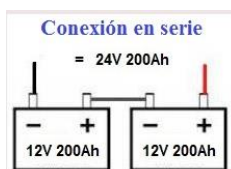


Fig.10: Conexión serie baterías [9]

En esta conexión el conjunto de baterías mantiene el mismo valor de capacidad que las celdas pero su voltaje equivale a multiplicar el voltaje de las celdas por el número total de celdas.

- Paralelo: El polo positivo de la celda está conectado al polo positivo de la siguiente y el negativo con el negativo.

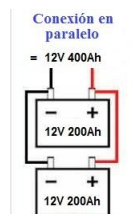


Fig.11: Conexión paralelo baterías [9]

En este tipo de conexión el voltaje se mantendrá pero la capacidad se verá multiplicada por el número de celdas.

Hay que tener presente que mientras el voltaje en cada celda de LiFePO_4 es un valor único (3,2 V aproximadamente), sí que es posible encontrar celdas de LiFePO_4 con diferentes valores de capacidad.

Solución propuesta

La primera variable que se debe definir para poder dimensionar el sistema de baterías correctamente es el tipo de tecnología en el que se basan estas.

De entre las baterías de litio, la elección final han sido las baterías de **LiFePO₄**, por presentar un voltaje más constante durante la descarga (cosa que garantiza que el kart no verá disminuida su potencia mientras esté rodando) y por ser más seguras que las otras de base litio. Un ejemplo son las baterías Li/Ion, las cuales presentan graves problemas al sobrecargarse, ya que pueden llegar a inflamarse e incluso, como ha ocurrido en algunos dispositivos portátiles, a explotar, causando graves daños a los usuarios.

Una vez determinado el tipo, se puede proceder a su dimensionamiento. Dicho dimensionamiento dependerá esencialmente de dos factores:

- Voltaje baterías: El voltaje de las baterías debe ser de **72V**, ya que se ha escogido un motor que trabaja a estos valores nominales.
- Capacidad (Ah): La capacidad de las baterías se ha de determinar mediante la especificación deseada de autonomía y un estudio de los consumos aproximados de los karts. Esto se ha realizado en el apartado “6.2.2.4.1 *Cálculo del consumo y aceleración del kart*” dentro del bloque “Análisis experimental”. El valor de capacidad que resulta de este estudio son **34,5 Ah**.

Nótese que el Ah no es una unidad del sistema internacional como el Culombio (C), pero se utilizan por ser las unidades con las que se mide comúnmente la capacidad de las baterías, facilitando así la comprensión de su magnitud.

$$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$$

Al no haberse encontrado baterías con estos valores de capacidad, se han escogido aquellas con el valor inmediatamente superior encontrado. Estas han sido las celdas **CALB CA040FI de 40 Ah**.



Fig.12: Celda CALB CA040FI [10]

Al haber hallado valores de capacidad cercanos al deseado, se ha decidido hacer una conexión de las baterías en serie, ya que de esta manera se reduce considerablemente el número de celdas necesarias para lograr los 72V requeridos.

Así, finalmente, se necesitaran:

$$N^{\circ} \text{ celdas} = \frac{\text{Voltaje requerido}}{\text{Voltaje celdas}} \quad (2)$$

$$N^{\circ} \text{ celdas} = \frac{72}{3,2} = 22,5 \text{ celdas} \quad (3)$$

La decisión final ha sido la de proponer el montaje en serie de **24 celdas de LiFePO₄ con capacidad 40 Ah.**

Este montaje nos proporciona una energía total acumulada en las baterías de:

$$E_{total}(J) = \text{Capacidad}(Ah) \cdot 3600 \cdot \text{Voltaje}(V) \quad (4)$$

$$E_{total}(J) = 40 \cdot 3600 \cdot 72 = 10,88 \cdot 10^6 J \quad (5)$$

Nunca se dispone de toda la energía almacenada en las baterías. La cantidad de energía disponible es comúnmente el 80% de la energía total almacenada. Así pues:

$$E_{disponible}(J) = E_{total}(J) \cdot 0,8 = 10,88 \cdot 10^6 \cdot 0,8 = 8,71 \cdot 10^6 J \quad (6)$$

4.2.3. BMS

Introducción

El BMS, como se ha visto, es un elemento necesario si se quieren utilizar baterías a base de litio. Las celdas del tipo de baterías utilizado (LiFePO₄) son capaces de trabajar en un rango entre 4,2-0V. Sin embargo, éstas se deterioran muy rápido si trabajan cerca de estos límites, por lo que es necesario algún tipo de elemento de control que regule el voltaje de estas durante los procesos de carga y descarga.

Además, dado que siempre existen pequeñas diferencias en la fabricación de cada una de las celdas que la componen, estas no presentan el mismo nivel de autodescarga y se experimentan ligeras diferencias entre sus curvas de voltaje/carga. Esto hace que, por ejemplo, durante el proceso de carga pueda haber una batería que se aproxime a valores de

voltaje no deseados mientras que las otras aún puedan almacenar más carga dentro de la zona segura. Así pues, no basta con cortar la alimentación cuando una alcance valores no deseados ya que se estaría dejando muchas otras a mitad de carga.

De aquí, otro motivo por el que es necesario usar los sistemas actuales de control de baterías, ya que son capaces de derivar la corriente de esas celdas cercanas al límite seguro hacia las que aún pueden almacenar más carga.

Tipos de BMS

Existen dos grandes familias cuando se habla de sistemas de gestión de baterías.

- **Sistemas pasivos:** Se utiliza una resistencia para disipar el exceso de carga que puede acumular la celda hasta que su tensión cae por debajo del límite de voltaje seguro. Aquí, vemos que con este método se desaprovecha parte de la energía. Aun así, la principal ventaja de este tipo de BMS radica en su sencillez y, por consiguiente, en su reducido coste y alta fiabilidad. Dentro de este grupo encontramos los BMS de: resistencia fija, resistencia conmutada y los basados en diodos Zener.
- **Sistemas activos:** Mediante condensadores se consigue aprovechar el exceso de carga de ciertas baterías para continuar cargando las demás. Esto resuelve el problema del desaprovechamiento de la energía, pero aumenta su complejidad, aumentando considerablemente el coste y el volumen que ocupa, a la vez que disminuye su fiabilidad frente a los dispositivos pasivos.

Modelo escogido

El modelo propuesto ha sido uno de la firma **EV Power** concretamente el **BCU-PEV-2.x**.

La elección de este modelo se ha basado en los siguientes criterios:

- Realiza de todas las operaciones de control de la batería necesarias para el caso de estudio. No se hace operaciones complejas innecesarias que compliquen su entendimiento e instalación.
- Montaje y puesta a punto muy sencilla.
- Compatibilidad 100% con las baterías CALB escogidas.

Existen otros modelos de BMS como los de la firma **ORION** o **RIMAC** que son más completos, pero a la vez mucho más complejos y sobredimensionados para nuestros propósitos.

BMS		
EV Power	ORION	RIMAC
		

Fig.13: Modelos de BMS estudiados. EV Power, ORION y RIMAC. [10], [11] y [12]

Funcionamiento

El modelo escogido pertenece a la familia de los BMS pasivos que trabajan con diodos Zener. Para comprender su funcionamiento primero hay que saber que el BMS consta de dos partes diferenciadas: **módulos de celda** y **la unidad de control**.

Módulos de celda

Son pequeñas unidades de control, las cuales trabajan autónomamente, conectadas en los bornes de cada una de las celdas de la batería (conexión en paralelo).

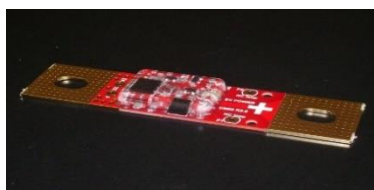


Fig.14: Módulo de celda EV POWER [10]

Sus funciones principales son:

- Regular el voltaje de las baterías durante la carga: Se encargan de que ninguna de las baterías sobrepase el valor seguro de voltaje que deben tener. Aunque su funcionamiento es muy complejo, éste se basa principalmente en la propiedad de los diodos Zener de mantener el voltaje entre sus terminales

constante y de conducir corriente, al sobrepasar un cierto límite (límite de ruptura).

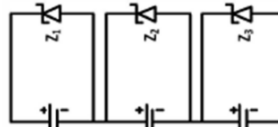


Fig.15: Interior módulos de celda [13]

De esta forma, conectados en paralelo con la batería y correctamente dimensionados para que su zona de ruptura corresponda con los 3,6 volts máximos permitidos, harán que el voltaje de las baterías no supere en ningún caso este valor. Si en algún momento la batería alcanza este valor, se empezará a derivar corriente de esta (se descargará la batería) por la rama del Zener (rama by-pass). Una pequeña parte de esta energía derivada se utilizará para cargar las baterías más descargadas.

- Enviar información del estado de las baterías a la unidad de control: Todos los módulos de celda se conectan entre sí y a su vez con la unidad de control para transmitir datos sobre el estado de las celdas.

La hoja de especificaciones de los módulos de celda utilizados se encuentra en el anexo A.2.1.

Unidad de control

La unidad de control es la encargada de recibir información del estado de las baterías mediante varios sensores y actuar sobre el sistema en consecuencia.



Fig.16: Unidad de control BCU-PEV-2.x [10]

Esta unidad de control presenta una alimentación a 12V, como las baterías son de 72V se necesita el convertidor DC/DC que se presenta más adelante.

El manual de la unidad de control está disponible en el anexo A.2.2.

Las entradas al sistema de control son las siguientes:

- Sensor efecto hall: Mide la corriente de salida de las baterías, lo que permite al sistema de control calcular el estado de carga de estas durante el proceso de descarga.
- Módulos de celda: Los módulos ya vistos anteriormente envían información del estado de las baterías durante la carga.
- Conexión directa con los bornes de la batería: Permite obtener una lectura instantánea de las variaciones en el voltaje de estas.

Las salidas de las que dispone el modelo escogido son:

- Display (opcional): Muestra, en una pantalla, información sobre: estado de carga, voltaje y capacidad de las baterías.
- Relé de descarga: Salida de 12V que controla un relé capaz de interrumpir la alimentación principal. Si durante el proceso de descarga alguna de las baterías se encuentra por debajo del nivel de carga recomendado, esta salida se hace cero, abriendo así el circuito principal y cortando la alimentación.
- Controlador de carga: Salida conectada directamente con el sistema de carga o cargador. Ésta controla el proceso de carga de las baterías siendo capaz de interrumpirlo si alguna de las celdas supera los valores seguros de voltaje.

4.2.4. Controlador

Introducción

En una aplicación como la que nos ocupa, donde se requieren cambios de velocidad, no se puede alimentar el motor de corriente continua directamente de una fuente de voltaje constante como son las baterías.

Como el par generado por el motor es proporcional a la intensidad de corriente que circula por

él y esta es función del potencial al que está sometido, será necesario regular este potencial si se quiere regular el par generado por el motor.

El dispositivo de la instalación eléctrica que se encarga de la regulación de este voltaje es el controlador. Esta regulación será función, como se verá, de las señales provenientes de acelerador y freno.

Modelo escogido

Los requerimientos para el controlador pasaban, en primer lugar, por:

Voltaje de trabajo	Intensidad máxima trabajo	Tipo de motor a controlar
72 (76,8) volts	400 A	Imanes permanentes

Con estas especificaciones presentes, se realiza una búsqueda de fabricantes de controladores y los modelos que estos ofrecen. Finalmente se comparan los tres modelos, de fabricantes diferentes, que mejor se ajustan a los requerimientos.

CONTROLADOR		
KELLY (KDZ72401)	ALLTRAX (SPM72401)	MAZANITA (ZILLA 1K)
		

Fig.17: Modelos de controlador estudiados. KELLY, ALLTRAX y MAZANITA. [14], [15] y [16]

Característica/Fabricante	KELLY	ALLTRAX	MANZANITA
Modelo	KDZ72400	SPM72401	ZILLA 1K
Voltaje nominal	72 V	72 V	72-156 V
Corriente máxima	400 A	400 A	1000 A
Precio	345,00 €	471,00 €	1.975,00 €

Con un primer análisis a esta tabla comparativa ya se puede descartar la opción de la marca MAZANITA, ya que está sobredimensionada para el tipo de aplicación que se requiere (sería un modelo más adecuado para un vehículo de competición).

Entre el modelo ofrecido por la marca KELLY o ALLTRAX se ha decidido finalmente optar por el de esta primera. A parte del hecho de tener un coste más reducido, la marca KELLY ofrece otros productos, como por ejemplo pedales, que aseguran compatibilidad 100% con su controlador.

La hoja de especificaciones del Kelly se encuentra en el anexo A.3.

Funcionamiento y configuración

El controlador se ubica entre el motor y la alimentación (baterías). De este modo a través de sus terminales B+ y M- el controlador es capaz de regular el voltaje entre los bornes del motor.

Esta regulación se realiza internamente en el controlador mediante una técnica conocida como PWM (pulse width modulation), es la misma que utilizan los convertidores DC/DC para recortar el voltaje. Así, esta técnica permitirá, en función de la demanda del acelerador y freno, recortar el voltaje de las baterías un cierto valor para que en entre los terminales del B+ y M- (equivalentes a los terminales del motor) exista el voltaje deseado en cada instante.

El controlador KELLY, al obtener datos también del freno, nos permite actuar también sobre la regeneración. La configuración deseada para esta se ha basado en el análisis realizado en el apartado “6.2.2.4.3 *Experimental frenada con regeneración*” dónde se compara la desaceleración del kart cuando se permite la regeneración con la que sufre únicamente por acción de las fuerzas opuestas al avance de éste. En dicho análisis se concluye que el controlador debe estar configurado para permitir la regeneración solo en el caso que se presione el pedal de freno, no antes.

El Kelly dispone también de una salida capaz de cortar el suministro eléctrico al motor, acción realizada mediante un relé, si se detecta alguna anomalía.

4.2.5. Cargador

Introducción

El cargador es el encargado de tomar la energía eléctrica de la red (corriente alterna) y suministrarla a las baterías para que estas la almacenen (corriente continua).

El cargador toma mucha importancia en las baterías basadas en el Litio, ya que el proceso de carga debe ser un proceso muy controlado. Así, los cargadores para este tipo de baterías deben disponer de algún método de control que en función de los datos recibidos del sistema de gestión de las baterías regule el proceso de carga.

Gran parte de estos cargadores disminuyen controladamente la intensidad que éste suministra a las baterías cuando éstas se acercan a los valores de voltaje máximos recomendados.

4.7.2 Elección

Los datos a tener presentes para la elección del cargador son los siguientes:

Voltaje baterías	Tipo baterías	Comunicación BMS	Tiempo carga máximo
72 V	LiFePO ₄	SÍ	El doble que el kart está en uso

Del estudio realizado en el apartado “5.2.2.4.4 Vuelta al circuito de Salou con el kart diseñado” se deduce que al motor se le suministra una intensidad instantánea media durante las tandas de 51 A. Así, se buscará un cargador capaz de suministrar como mínimo 26 A durante la carga a las baterías.

Solo se ha encontrado un cargador en el mercado que cumpliera con la totalidad de estas especificaciones. Ha sido el **POW72V35A/BMS** de la firma **EV Power**.



Fig.18: Cargador POW72V35A/BMS [17]

Dicho cargador presenta las siguientes características principales:

- Voltaje nominal: 72V (76,8 reales (24 celdas))
- Conexión directa con unidades BMS (compatible con el modelo de BMS utilizado)
- Intensidad máxima suministrada: 35 A
- Display donde se permiten ver los valores instantáneos de intensidad y voltajes suministrados.

4.2.6. Acelerador y freno

4.8.1 Introducción

En todos los vehículos, tanto eléctricos como de combustión, se necesita saber la demanda de velocidad que desea el conductor. Esto se implementa comúnmente mediante el uso de los pedales del acelerador y el freno.

El caso concreto que nos ocupa, vehículos eléctricos, los pedales informa al controlador de la cantidad de corriente que se debe entregar al motor eléctrico. Esto se realiza mediante el uso de un potenciómetro que traduce la presión ejercida sobre los pedales en una señal eléctrica de una cierta intensidad, la cual es capaz de medir y analizar el controlador.

4.8.2 Solución

Para asegurar una completa compatibilidad entre el controlador y las señales originadas por los pedales, se han elegido unos pedales de la misma firma que el controlador, KELLY. Concretamente, tanto para el acelerador como para el freno se ha elegido el **Kelly 0-5K Throttle Pedal**.



Fig.19: Pedal Kelly 0-5K Throttle Pedal [3]

4.8.3 Funcionamiento

Este modelo en concreto se basa en la acción de una resistencia variable que se mueve en un intervalo de 0 a 5 k Ω , siendo 0 Ω el valor de dicha resistencia cuando no se está ejerciendo ninguna presión sobre el pedal y 5 k Ω el valor cuando el pedal está completamente presionado.

Así, sometido a un voltaje constante, la intensidad que circulará por la resistencia variará en función de la presión ejercida. Este valor de intensidad será pues recogido y analizado por el controlador.

Una vez descritos los componentes principales de la instalación eléctrica se continuará describiendo los elementos secundarios de seguridad y control de la instalación. El grupo de elementos secundarios está formado por:

7. Relés
8. Fusibles
9. Convertidores DC/DC
10. Derivación al chasis

4.2.7. Relés

Propósito

El propósito principal de los relés es el de controlar circuitos sometidos a una potencia muy superior a la de la entrada del relé. En nuestro caso nos permitirán controlar la apertura o cierre del circuito de alimentación principal (72 volts) mediante una alimentación de 12 volts.

Modelo utilizado

Los tres relés utilizados en la instalación trabajan bajo las mismas condiciones, tienen que ser capaces de cortar una corriente de 300 A. Así pues, los tres relés utilizados corresponden a un mismo modelo:

- Fabricante: KELLY CONTROLLER
- Modelo: ZJW 12VDC Coils 400Amps



Fig.20: Relé ZJW 12VDC Coils 400Amps [3]

Característica	Valor
Corriente máxima ruptura	400 A
Corriente máxima bobina	1,5 A
Voltaje bornes bobina	12 VDC
Ciclo de vida	50.000 ops

Este modelo es capaz de cortar el paso de corriente hasta un máximo de 400 A y está alimentado por una tensión de 12 volts. Como nuestra alimentación principal puede alcanzar los 300 A de intensidad, este modelo es el que se ajusta mejor a nuestras necesidades.

Funcionamiento

El funcionamiento del relé es bastante simple. Éste, contiene dos varillas metálicas que representan los terminales de entrada y salida del circuito que se pretende controlar. Dichas varillas hacen contacto o no en función de la excitación de una bobina excitada por un circuito independiente de 12V. Al excitarse la bobina, esta crea un campo magnético que repele una de las varillas hacia la otra, permitiendo así en contacto entre ambas y abriendo el circuito.



Fig.21: Mecanismo interior relés [18]

En los relés actuados por sistemas digitales (controlador y BMS) se tiene un diodo de protección que descarga la bobina impidiendo que la corriente acumulada por éstas vuelva a los sistemas digitales, lo cual podría provocar graves daños en éstos.

4.2.8. Fusibles

Propósito

El papel de los fusibles en un circuito es el de proteger ciertas regiones de una instalación eléctrica y sus elementos frente a sobreintensidades, las cuales pueden dañar estos elementos. La característica que los define es la intensidad máxima que dejan circular antes de impedir el paso de corriente.

Modelo utilizado

En nuestra instalación hay fusibles capaces de soportar intensidades muy diversas. Concretamente encontramos fusibles de: 350A (protección instalación general), 500mA (protección BMS), 315mA (protección convertidor DC/DC) y 150mA (protección controlador).

Los modelos escogidos para cada uno de ellos han sido:

Corriente nominal	Modelo
350 A	ANL-350 (Firma: EATON)
500 mA	BK/GMA-500MA (Firma: EATON)
315 mA	BK/GMA-315MA (Firma: EATON)
150 mA	BK/GMC-150MA-ND (Firma: EATON)



Fig.22: Fusible ANL-350 (EATON) [18]

Funcionamiento

La acción del fusible se basa en el incremento de temperatura que experimenta un conductor cuando circula corriente a través de él. Los fusibles disponen de un conductor que hace de puente entre sus terminales. Cuando la temperatura del conductor supera su temperatura de fusión (sobreintensidad), éste se funde, impidiendo así el paso de corriente a través de él y por tanto aguas debajo³.

³ Aguas abajo: Término utilizado en los circuitos eléctricos para simbolizar toda esa parte del circuito que recibe corriente después de un cierto punto.

De esto se deduce que estos componentes serán de un solo uso ya que quedarán inutilizados una vez se funda el conductor. Habrá que reponer estos componentes periódicamente, cada vez que el circuito sufra de sobreintensidades.

4.2.9. Convertidores DC/DC

Propósito

El objetivo de este elemento es el de transformar la corriente continua de una tensión a otra. En nuestro caso concreto es necesario para transformar la corriente continua de 72V proveniente de las baterías en corriente continua de 12V, utilizada por el BMS y por el relé gobernado por el pulsador del piloto.

Modelo escogido

Otro parámetro a tener en cuenta para dimensionar el convertidor es la potencia que se debe alimentar con estos 12V. En nuestro caso el BMS consume como máximo 5 watts de potencia y el relé 1,2 watts, con lo que será suficiente con un convertidor de 6 watts de potencia.

El modelo de convertidor escogido ha sido un **TMR 6-4822WI** de la firma **TRACO POWER**. Este modelo en particular puede trabajar con valores positivos y negativos de voltaje según los terminales en que se opere (Hoja de especificaciones disponible en anexo A.4).



Fig.23: Convertidor DC/DC TMR 6-4822WI [20]

Característica	Valor
Voltaje entrada	72 V
Voltaje salida	+12V, -12V
Intensidad salida máxima	+250mA, -250mA
Intensidad entrada máxima permitida	315mA

Funcionamiento

El funcionamiento del convertidor DC/DC puede llegar a ser muy complejo y para lograr comprenderlo se necesitaría introducir varios conocimientos complejos de electrónica, lo cual se escapa del propósito de este apartado. Basta con decir que su funcionamiento se basa fundamentalmente en la técnica del PWM (pulse width modulation) la cual recorta el voltaje de entrada para lograr el voltaje de salida deseado.

4.2.10. Derivación al chasis

La derivación al chasis consiste en dirigir las posibles corrientes de fuga que surjan en los elementos de gran potencial al chasis. Esto no es un elemento de protección sino un sistema de aviso de que estas fugas se están produciendo. Durante las tareas de mantenimiento se utilizará algún elemento de medición para determinar si circula corriente o no por esta rama. Si circulara corriente significaría que alguno de los elementos de gran potencial presenta una fuga y que, por tanto, tiene que ser reparado o sustituido.

Aunque como no hay una legislación vigente no es de obligado cumplimiento, la reglamentación para los vehículos de competición de este estilo regula que, al final de esta rama de derivación, debe existir una resistencia de valor nominal mínimo 100Ω por cada volt presente en la instalación. De esta manera, se limita la corriente máxima que circulará por esta rama del circuito y por el chasis a escasos mA.

Para alcanzar la mayor seguridad posible, se ha seguido esta regulación. Para la aplicación aquí presentada, al trabajar a 72V, el valor de la resistencia debe ser como mínimo:

$$\text{Valor resistencia mínimo} = 7,2k\Omega$$

Para más seguridad y según disponibilidad en el mercado, se ha escogido una resistencia de 10 k Ω . Esto conllevaría como máximo una intensidad de 7,2 mA en esta rama y en el chasis.

5. ANALISIS EXPERIMENTAL

5.1. Objetivos

En todo estudio o proyecto de desarrollo de un cierto producto se hace necesario llevar a cabo un trabajo experimental que ayude a encontrar las características más adecuadas para dicho producto.

El objetivo general de este trabajo experimental es el de proporcionar los datos y resultados tales que, permitan justificar el dimensionamiento cada uno de los componentes que conforman la instalación eléctrica del vehículo.

Para esto, se hace necesario, en primer lugar, la determinación de las especificaciones funcionales (velocidad máxima, aceleración y autonomía) deseadas para el kart. Posteriormente, hay que analizar el comportamiento del kart para poder encontrar esa configuración y esos componentes que nos permitan cumplir con las especificaciones deseadas.

Así, se han llevado a cabo dos tipos de trabajos diferenciados.

Para lograr tener una mejor idea de las prestaciones que debería llegar a tener el kart, se ha realizado:

- Visita Karting Eléctrico: Visita a un karting operado exclusivamente por karts eléctricos donde poder recopilar dicha información. También se aprovechó la visita para experimentar la conducción con este tipo de vehículos, a la vez que se parametrizaban una serie de datos, útiles más adelante.

Una vez obtenidos estos datos se ha procedido a:

- Realización de un Simulador: La parte esencial del trabajo experimental ha consistido en la confección de un simulador capaz de simular el comportamiento del vehículo. Esto permite observar cómo evoluciona el comportamiento del kart al variar una serie de parámetros de interés, lo que ayudará a determinar la mejor configuración de éste.

Como ya se ha comentado, con los datos proporcionados por este análisis se pretende ser capaz de dimensionar por completo la instalación eléctrica de todo el kart, así como proponer la mejor configuración/programación para los controladores presentes en ésta.

5.2. Trabajo experimental

A continuación se muestran detalladamente los dos trabajos experimentales llevados a cabo que permitirán extraer los resultados y conclusiones necesarias para, posteriormente, dimensionar correctamente toda la instalación eléctrica del kart.

5.2.1. Visita Karting Eléctrico

El primer trabajo experimental consistió en realizar una visita a un Karting operado exclusivamente por karts eléctricos. Como ya se ha visto anteriormente, en España solo existen dos kartings de este estilo pero, por fortuna, uno de ellos se encuentra en Salou. Aquí es donde se realizó la visita.

5.2.1.1. Introducción Karting Salou

El nombre oficial de dicho karting es “Electric Karting Salou”. Está situado en la localidad de Salou (Tarragona), al lado del parque temático Port Aventura. Fue inaugurado en 2013 y fue el primer karting eléctrico de toda España, lo que nos da una idea de la poca presencia de este tipo de vehículos en nuestro país.

Es un karting operado única y exclusivamente por karts eléctricos. Consta de dos circuitos, uno para adultos y uno para niños cada uno de los cuales operado por un tipo de kart diferente.



Fig.24: Vista circuito “Electric Karting Salou”

5.2.1.2. Objetivos de la visita

Con esta visita se quería abordar una serie de objetivos:

1. Recopilar información: En primer lugar, se quería recoger la máxima información posible de ciertos temas cable:
 - Legislación: Al no encontrar por internet ninguna referencia a la legislación que debían seguir los karts eléctricos utilizados para aplicaciones recreativas, se quería preguntar directamente a los operadores del karting a qué tipo de regulaciones estaban sujetos los karts, y el karting, por el hecho de ser eléctricos.
 - Componentes: Una de las partes fundamentales pasaba por ver algún kart desmontado, para poder observar la distribución de todos los componentes de la instalación. Así, también se pretendía anotar que modelo específico de componentes eran usados (tipo de transmisión, baterías y motor).
 - Prestaciones: Fue una oportunidad para tener una idea de las prestaciones que tenían este tipo de vehículos, principalmente lo referente a: autonomía, velocidad y aceleración.
2. Probar la conducción con karts eléctricos: Habiendo conducido anteriormente karts de gasolina, se quería contrastar el tipo de conducción y sensaciones entre un tipo de kart y el otro.
3. Parametrizar datos de velocidad: Uno de los objetivos principales pasaba por parametrizar, mediante alguna aplicación, el comportamiento del kart (fundamentalmente la velocidad), durante una serie de vueltas al circuito.

5.2.1.3. Explicación de la visita

El 20 de Abril de 2015 se realizó la visita al Electric Karting Salou. Anteriormente nos habíamos puesto en contacto con los responsables del karting para explicar nuestra situación e intenciones y así asegurarnos que no habría ningún problema a nuestra llegada.

En primer lugar se realizó una tanda de vueltas al circuito. Dicha tanda tenía una duración de 10 minutos. Aquí, se pudo experimentar la conducción con este tipo de vehículos, donde lo primero que se pudo comprobar es el escaso ruido que hace el motor eléctrico en

comparación con el de combustión. Durante la tanda también se pudieron recopilar mediante una aplicación móvil los datos que necesarios para la parametrización la velocidad (se dedicará un apartado más adelante en el que se detallará esta toma de datos).

Una vez finalizada la tanda pudimos hablar con el máximo responsable del karting, quien nos resolvió gran parte de las dudas que le presentamos así como nos proporcionó otros datos interesantes los cuales no nos habíamos planteado.

Además, disponían de un kart infantil desmontado, con lo que pudimos ver con todo detalle la distribución de todos los elementos, así como la del cableado eléctrico, el tipo de transmisión, tipo de baterías y otros elementos ya referentes a la parte mecánica del kart.



Fig.25: Interior kart infantil "Electric Karting Salou"

Aun siendo el modelo infantil ya sirvió para tener una idea clara de toda la distribución, ya que, la esencia del modelo adulto es la misma, solo que con un motor más potente, más celdas de batería y estas colocadas en los laterales en vez de en la parte trasera.

Al finalizar la visita nos dieron una hoja con el resumen de nuestros tiempos, hechos durante las vueltas al circuito, así como un mail directo de contacto por si nos surgía alguna duda durante las etapas más avanzadas del proyecto.

5.2.1.4. Toma de muestras

A continuación se detalla el proceso seguido para parametrizar los valores de velocidad durante las vueltas al circuito de Salou.

En primer lugar se eligió la aplicación móvil “My Tracks” para recopilar dichos datos. “My Tracks” es una aplicación desarrollada por Google Inc. la cual, mediante localización GPS, permite registrar los datos de velocidad del usuario en función del tiempo. Entre otras funciones, permite graficar el recorrido mediante una imagen satélite y exportar los datos a la cuenta de Google Drive, para poder tenerlos disponibles en el ordenador.

En una misma tanda mi compañero Carles y yo, llevamos el móvil encima con la aplicación activada registrando por partida doble los datos de los vehículos. Además, se grabó con una cámara especializada “Go Pro” toda la tanda. Al activar al mismo tiempo la aplicación y la grabación podríamos ser capaces de comprobar la relación entre las gráficas de la aplicación “My Tracks” y la realidad en un cierto instante de tiempo.

5.2.1.5. Datos e información obtenida

A raíz de la visita se obtuvieron una serie de datos y se recopiló una serie de información, la cual daba respuesta a las preguntas que nos habíamos planteado previamente.

Siguiendo la estructura realizada en los objetivos:

1. Información recopilada:

- Legislación: Se confirmó que al ser un producto relativamente novedoso y con tan poca implantación en nuestro país no existía ningún tipo de regulación que controlara el uso de este tipo de vehículos. Solo existe una norma que hace referencia a la propia instalación de karting: *“No está permitido tener ningún vehículo de combustión dentro de las instalaciones”*. Otra norma, la cual no distingue entre karts eléctricos o de combustión, es la que limita la velocidad máxima en este tipo de kartings a 70 km/h.
- Componentes: Los karts adultos utilizados en el “Electric Karting Salou” corresponden al modelo ECOVOLT NG de la firma BIZ KARTS.



Fig.26 y 27: Vistas frontal y lateral del kart adulto “Electric Karting Salou”

Este modelo está equipado con:

Motor	Batería	Transmisión
AGNI-200	Tipo: LiFePO4 Nº celdas: 32 Voltaje: 55 Volts Capacidad: 60 Ah Vida útil: 9000 tandas Sistema BMS Integrado	Tipo: Correas dentadas Relación de transmisión: 3

- Prestaciones: En la visita ya se nos facilitaron algunos datos de interés que nos permitían tener una idea aproximada de las prestaciones de este tipo de vehículos.
 - Aunque la velocidad máxima alcanzable por los karts, con la relación de transmisión adecuada, es de unos 80 km/h, la velocidad en este tipo de circuitos está limitada a 70 km/h de máxima. En el circuito de Salou, con la relación de transmisión utilizada, la velocidad se limitaba a 60 km/h.
 - La autonomía de los karts puede llegar a los 40 min, según el uso que se les dé. Aun así, estos se recargan después de cada tanda para asegurar el máximo rendimiento de las baterías en cada una de éstas.

2. Probar la conducción con karts eléctricos: Como ya se ha comentado anteriormente, la primera sorpresa al conducir este tipo de vehículos fue el escaso ruido del motor eléctrico en comparación con el motor de combustión. Se pudo comprobar también que la sensación de velocidad y aceleración de los karts eléctricos no tiene nada que envidiar a la de los karts de gasolina. Es más, al no haber gasolina no es necesario el uso de mono lo que aumenta dichas sensaciones.
3. Parametrizar datos de velocidad y aceleración: Como se ha comentado en el apartado anterior, mediante la aplicación móvil “My Tracks” se parametrizaron los datos de velocidad durante los 10 minutos que duraba la tanda. Estas fueron las gráficas obtenidas:



Fig.28: Gráfico velocidad/tiempo una tanda circuito “Electric karting Salou” (Aplicación: My Tracks)

De dicha gráfica se puede extraer la siguiente información:

- Velocidad máxima alcanzada: 40-45 km/h
- Velocidad media: 35 km/h
- Perfil de velocidades de una vuelta: Gracias a la gráfica obtenida mediante la aplicación “My tracks” y la grabación con la cámara “Go Pro” se ha podido determinar el perfil de velocidades del kart durante una vuelta al circuito.

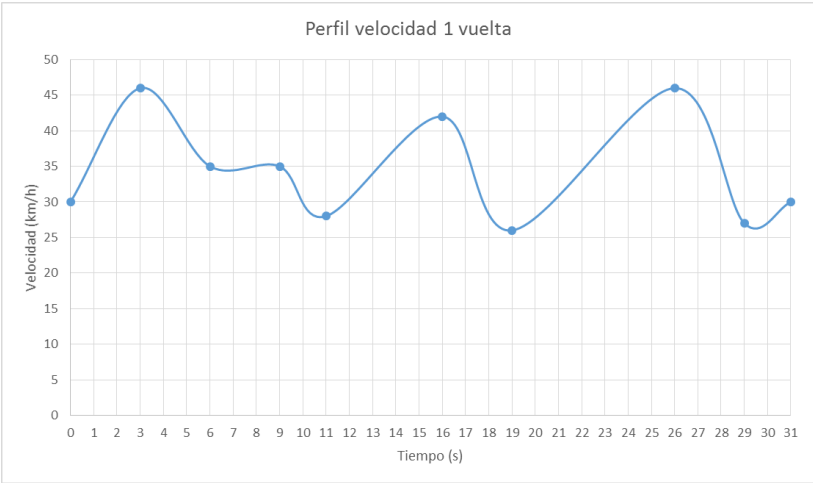


Fig.29: Perfil de velocidades de una vuelta al circuito “Electric Karting Salou”

Se ha plasmado este perfil sobre una foto satélite del circuito de Salou mediante una escala de colores.

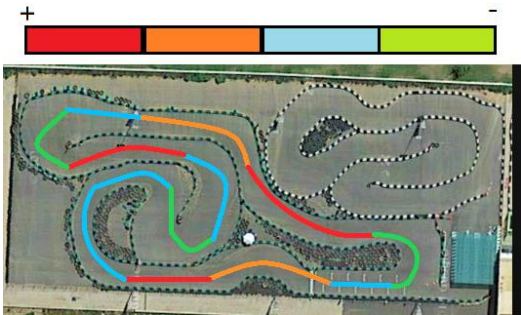


Fig.24: Mapa de velocidades sobre vista satélite del circuito

Estas gráficas serán de gran ayuda al hacer el simulador, ya que se dispondrán de datos reales y así los resultados podrán ser contrastados con los valores teóricos, lo que permitirá verificar la validez o no del simulador.

5.3.1.5 Resumen y conclusiones visita

Una vez analizados y tratados los datos obtenidos durante la visita al karting de Salou se han extraído las siguientes conclusiones y consecuencias sobre el diseño del kart:

Conclusión	Consecuencia
No se aplica ninguna legislación eléctrica específica a los karts eléctricos utilizado en aplicaciones de ocio	No habrá prácticamente límites legales que limiten el diseño de la instalación eléctrica del vehículo

Aunque se recargan los karts al finalizar cada tanda, estos disponen de gran autonomía.	Diseño de karts con valores elevados de autonomía.
Velocidades alcanzadas en los circuitos no suelen superar los 50 km/h	No hace falta diseñar karts capaces de alcanzar grandes velocidades. Al haber grandes variaciones de éstas se hace más necesario potenciar la aceleración

Al margen de esto, como se ha visto, se han obtenido especificaciones técnicas sobre el kart utilizado en Salou: modelo del motor, especificaciones baterías, métodos de control de carga y descarga de baterías utilizados y tipo de transmisión. Esto también será de gran ayuda al empezar a diseñar el vehículo.

5.2.2. Realización simulador

El segundo trabajo experimental consistía en la realización de un simulador que permitiera representar el comportamiento de un kart al variar una serie de parámetros de interés.

5.2.2.1. Introducción y objetivos

Dicho simulador se ha confeccionado mediante el programa de cálculo Excel 365, desarrollado por Microsoft. Se ha utilizado este programa por ser un programa ya utilizado anteriormente, relativamente sencillo e intuitivo pero que permite la realización de operaciones y tareas complejas.

El objetivo principal es el de obtener un único simulador que nos permita parametrizar en cada instante de tiempo todos los valores y variables que intervienen durante el movimiento de este tipo de vehículos (velocidad, aceleración, fuerzas sobre el kart y energía consumida, entre otras).

Con este simulador se pretende ser capaz de realizar los siguientes análisis:

- *Cálculo del consumo y aceleración del kart:* Al tener el perfil de velocidades de una vuelta al circuito de Salou, se podrá ajustar el simulador para que el kart realice el mismo perfil de velocidades. Con esto se podrá obtener:

- El consumo aproximado de un kart en este tipo de circuitos. Esto, junto a la especificación deseada de autonomía, nos servirá para dimensionar las baterías de nuestro kart.
- La aceleración máxima que alcanza el kart de Salou en una vuelta al circuito. Esto nos servirá de guía para proponer un valor de aceleración para la especificación de nuestro kart.
- *Análisis del comportamiento dinámico del kart al variar el motor y la relación de transmisión:* Este análisis permitirá comparar cómo se comporta el kart al variar el motor. Esto ayudará a decidir qué modelo de motor es el que proporciona al kart esas prestaciones más cercanas a las deseadas. Además, este análisis también ayudará a determinar la relación de transmisión óptima, en función del motor escogido y las prestaciones deseadas.
- *Experimentar las variaciones en el comportamiento del kart durante la frenada según el tipo de regeneración:* Esto será de gran ayuda para entender el efecto de la regeneración en la frenada y así poder determinar la mejor configuración y control de esta característica.
- *Vuelta al circuito de Salou con el kart diseñado:* Se simulará el comportamiento de nuestro kart sobre el trazado de Salou. Se determinará aproximadamente el tiempo que tardaría nuestro kart en completar una vuelta al circuito (bajo el mismo tipo de conducción, el nuestro) y el consumo que éste tendría.

Una vez realizados estos análisis, se sacarán una serie de conclusiones que, junto a las encontradas gracias a la visita al karting de Salou, deberían servir para dimensionar completamente la instalación eléctrica y escoger la configuración óptima del vehículo.

5.2.2.2. Fundamentos teóricos

Para poder entender el simulador, así como todas las variables y parámetros implícitos en éste, se han de presentar algunos conceptos teóricos. Así, en este apartado, se tratarán de comprender las ecuaciones que intervienen en el movimiento del kart.

Por un lado, se explicarán todas esas ecuaciones electromecánicas que gobiernan el proceso de transformación de la energía eléctrica almacenada en las baterías en la energía mecánica

que hace desplazar el kart. También se expondrán todas esas fuerzas de resistencia al avance, presentes en los vehículos en movimiento, así como las ecuaciones que las definen.

Ecuaciones electromecánicas

Para mejorar el entendimiento de este proceso y las ecuaciones que intervienen, se presenta, en primer lugar, el siguiente esquema:

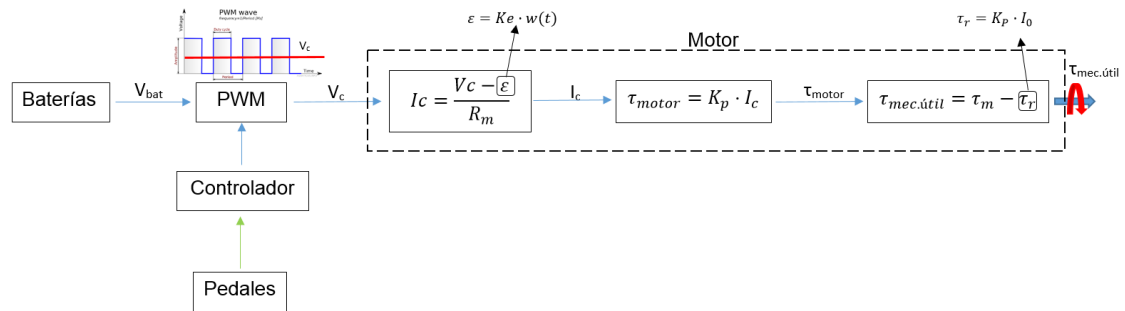


Fig.30: Proceso transformación energía eléctrica (baterías) en mecánica (motor)

Como se puede apreciar, el primer proceso consiste en recortar el voltaje presente en las baterías (V_{bat}) mediante la acción de un controlador que usa, para dicho propósito, la técnica del PWM, regulada por la posición del pedal (proceso ya detallado en apartados anteriores). Esto produce un nuevo voltaje que será el que se suministrará finalmente al motor (V_c).

El parámetro de mayor interés del motor es la intensidad que circula por él (I_c). Dicha intensidad se deduce de la expresión:

$$I_c(t) = \frac{V_c(t) - \varepsilon(t)}{R_m} \quad (7)$$

Donde $\varepsilon(t)$ representa la fuerza contra electromotriz del motor y R_m la resistencia interna del motor. Dicha fuerza ε se genera cuando las espiras del rotor en movimiento cortan las líneas de campo magnético, esta es contraria a la causa que provoca dicho movimiento (V_c). En definitiva, es una fuerza que tiende a frena el motor y se define como:

$$\varepsilon(t) = K_e(t) \cdot w(t) \quad (8)$$

Donde K_e es una constante propia del motor (Constante fuerza contra electromotriz) y $w(t)$ es la velocidad angular del rotor.

El par total generado por el motor se calcula a partir de la intensidad que circula por él según la expresión:

$$\tau_{motor}(t) = K_p \cdot I_c(t) \quad (9)$$

Donde K_p es una constante propia del motor (Constante torque electromagnético).

Sin embargo, éste no es el par presente en el eje del motor ($\tau_{mec.útil}$) ya que en el motor también hay una serie de resistencias que se oponen al movimiento del mismo. Estas resistencias se engloban dentro del par resistente del motor (τ_r). Así, finalmente, podemos definir el par presente en el eje del motor como:

$$\tau_{mec.útil}(t) = \tau_{motor}(t) - \tau_r \quad (10)$$

$$\tau_r = K_p \cdot I_0 \quad (11)$$

Siendo I_0 la corriente que circula por el motor cuando éste no está sometido a ninguna carga.

Ecuaciones resistencia al avance

Existen, principalmente, tres tipos de fuerza que se oponen al avance de los vehículos:

1. Fuerza de resistencia a la rodadura
2. Fuerza de resistencia aerodinámica
3. Gravedad

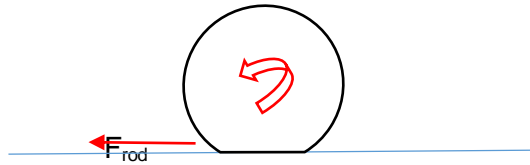
Si consideramos que el kart “Rueda pero no desliza”, la fricción por deslizamiento la obviaremos.

La acción de estas fuerzas, junto con la acción del propio movimiento del vehículo y las inercias correspondientes, se reducirán al eje del motor.

Veamos pues detalladamente como se definen estos tres tipos de fuerzas.

Fuerza de resistencia a la rodadura

En la realidad, las ruedas no son un sólido rígido, con lo que éstas se deformarán al estar en contacto con el asfalto. Con esto, la normal no estará aplicada en el centro de la rueda, lo que provocará un par resistente opuesto al giro de ésta, definido por la fuerza de resistencia a la rodadura (F_{rod}).



$$F_{rod} = N \cdot C_{rr} = N \cdot \frac{\mu_r}{R} \quad (12)$$

C_{rr} : Coeficiente rodadura

μ_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura

Fuerza de resistencia aerodinámica

Otra fuerza que se opone al movimiento del kart es la que realiza el aire sobre éste. Consideramos solo la componente frontal de esta fuerza, despreciando las componentes lateral y vertical.

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad (13)$$

C_x : coeficiente resistencia aerodinámico

A : superficie frontal vehículo

ρ : densidad del aire

v : velocidad

Gravedad

Esta fuerza solo estará presente cuando haya algún desnivel. Esto no es típico de los circuitos de karts por lo que, como se verá, se considerará cero durante la simulación.

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

m : masa kart

g : gravedad (9,81 m/s²)

α : ángulo pendiente

Dichos parámetros son:

Nombre parámetro	Notación	Valor	Unidades
Voltaje baterías	V_{bat}		V
Resistencia interna motor	R_m		Ω
Cte. fuerza electromotriz	K_e		V/(rad·s)
Cte. torque electromagnético	K_p		(N·m)/A
Par resistente motor	τ_0		N·m
Relación de transmisión	i		-
Masa total kart	m_t		Kg
Inercia motor	J		$Kg \cdot m^2$
Coefficiente de rodadura	C_{rr}		-
Coef. Resistencia aerodinámica	C_x		-
Área frontal kart	A_f		m^2
Densidad del aire	ρ_a		Kg/m^3
Radio ruedas	R_r		m
Inercia ruedas traseras	I_{zz}		$Kg \cdot m^2$
Inercia ruedas delanteras	I_{zz}		$Kg \cdot m^2$
Regeneración	Reg.		-

Fig.32: Extracto del simulador (parámetros)

Gran parte de estos parámetros ya han sido tratados en apartados anteriores, por lo que no se procederá a explicarlos de nuevo. Sin embargo, algunos de ellos si necesitan una especial mención por su importancia o por no haberse tratado anteriormente. Es el caso de:

- *Inercia de las ruedas traseras y delanteras*: La inercia o momento de inercia de las ruedas refleja la distribución de la masa de estas respecto a su eje de giro. Estos parámetros serán de gran importancia al describir el movimiento del vehículo.
- *Regeneración*: En apartados anteriores ya se ha visto en qué consistía el fenómeno de la regeneración de los motores eléctricos. Con este parámetro, se pretende controlar el efecto o no de esta durante la desaceleración del kart. Así pues, si se le asigna la palabra “SI”, se tendrá en cuenta el freno regenerativo en la frenada, mientras que si se le asigna la palabra “NO” este tipo de freno no estará presente.

Características del motor escogido

Por su gran influencia en el comportamiento del kart se dedica una zona especial para detallar las características técnicas del motor escogido.

Las características más relevantes de un motor, a las cuales ya se ha hecho mención en apartados anteriores, se muestran en la siguiente tabla:

Motor	
I_{max} (A)	
Corriente sin carga	
Constante velocidad	
Resistencia armadura	
Inercia armadura	
Voltaje nominal	
Constante de par	

Fig.33: Extracto del simulador (Tabla propiedades del motor)

A partir de estas características se obtienen algunos de los parámetros vistos anteriormente. Es el caso de:

- R_m : La resistencia del motor corresponde al valor de la “Resistencia armadura”.
- K_p : La constante de torque electromagnético se obtiene directamente de la característica “Constante de par”.
- K_e : La K_e cuyas unidades en el S.I son V/(rad·s) se obtienen de aplicar el factor de conversión adecuado a la variable “Constante velocidad” cuyas unidades son rpm/V.
- T_0 : El par resistente del motor se obtiene a partir de la K_p y la variable “Corriente sin carga” (I_0). Dicha relación ya se ha visto anteriormente que corresponde al producto de estos dos valores.

Parámetros propios simulación

Como parámetros propios de la simulación se han entendido aquellos parámetros que determinan el tipo de simulación que se quiere llevar a cabo.

En este caso, al ser una simulación sencilla, únicamente disponemos de un parámetro:

Intervalo de tiempo (s)	
-------------------------	--

Fig.34: Extracto del simulador (paso de tiempo)

Dicho parámetro nos servirá para fijar el paso de tiempo de nuestra simulación. Es decir, el tiempo que transcurrirá entre dos instantes consecutivos de la simulación. Como menor sea este valor más precisión y exactitud tendrán los valores obtenidos con la simulación.

La simulación

La parte dedicada a las variables intermedias y finales que intervienen en la simulación es la más compleja y la que merece una mayor atención.

Como ya se ha comentado, el objetivo principal del simulador es el de estudiar la dinámica del vehículo, es decir, encontrar los valores de velocidad y aceleración en cada instante de tiempo.

Se puede apreciar en la Fig.31 que en la simulación existen tres bloques diferenciados referentes a:

1. Proceso de conversión de energía eléctrica en aceleración del vehículo
2. Acción de los pedales y el efecto de estos sobre la V_c
3. Fuerzas de resistencia al avance

Antes de abordar el bloque 1 es necesario prestar atención a los bloques 2 y 3, ya que explican parte de las variables implícitas en 1.

Acción de los pedales y efecto de estos sobre la V_c

Dicha sección está gobernada por las variables:

Acelerador	Freno	V_c (V)

Fig.35: Extracto del simulador (Acción de los pedales)

- *Acelerador*: Esta variable toma valores e $[0, 1]$ y representa una medida de la presión que se ejerce sobre el pedal del acelerador. El 0 simboliza que no se está pisando el acelerador y 1 que se está pisando “a fondo”.
- *V_c* : Como se ha visto la V_c es el voltaje que recibe el motor, correspondiente al voltaje recortado de las baterías mediante el PWM del controlador. Para no complicarlo en exceso, se ha relacionado directamente el recorte realizado por el PWM con el valor de la variable acelerador. Siendo así:

$$V_c = V_{bat} \cdot Acelerador \quad (15)$$

- *Freno*: El freno presenta la misma interpretación numérica que el caso del acelerador. Al no considerarse freno mecánico, su efecto se relacionará puramente con la regeneración y su efecto estará presente en la intensidad que circula por el motor (I_c), como se mostrará más adelante.

Fuerzas de resistencia al avance

Bloque dedicado exclusivamente a las fuerzas que oponen una resistencia al avance del vehículo. Como ya se ha avanzado, estas serán la fuerza de resistencia a la rodadura (F_{rod}) y la fuerza de resistencia aerodinámica (F_a), la fuerza debida a la gravedad no se contempla debido a la no presencia de desniveles.

F_a (N)	F_{rod} (N)

Fig.36: Extracto del simulador (Fuerzas resistencia avance)

Como única condición destacar que dichas fuerzas serán siempre mayores o iguales a cero.

Proceso de conversión de energía eléctrica en aceleración del vehículo

Esta es la parte principal del simulador, así como la más compleja. Aquí ya se será capaz de calcular los valores de velocidad y aceleración del kart en los instantes de tiempo requeridos.

Las variables que están presentes en este proceso son las siguientes:

Instante de tiempo	V. Kart (m/s)	V. Ruedas (rad/s)	V. Motor (rad/s)	I_c (teórica) (A)	I_c (real) (A)	Par motor (N·m)	Aceleración (m/s^2)	V. Kart (Km/h)

Fig.37: Extracto del simulador (Proceso conversión energía eléctrica en aceleración)

Veamos pues, como se definen y a qué condiciones especiales están sujetas cada una de ellas.

- *Instante de tiempo*: Nos señala el instante exacto de tiempo en el que se da una cierta situación. Dicha variable valdrá cero en el instante inicial y se irá incrementando su valor a razón del paso de tiempo de simulación.
- *V.Kart (m/s)*: Nos determina la velocidad del kart en unidades m/s. Aun siendo una de las variables de salida, en el instante cero se fijará un valor inicial de ésta para poder empezar a simular. Mediante la integración por rectángulos, los instantes posteriores vendrán determinados por:

$$V_t = V_{t-1} + (Aceleración)_{t-1} \cdot (Paso de tiempo) \quad (16)$$

- *V.Ruedas (rad/s)*: Esta variable hace referencia a la velocidad angular de las ruedas del kart en unidades del S.I (rad/s). Se define como:

$$V_{ruedas}(rad/s) = V_{kart}(m/s) \cdot R_r(m) \quad (17)$$

- *V.Motor (rad/s)*: Muestra la velocidad angular del motor en (rad/s). Su valor se deduce de la expresión:

$$V_{motor}(rad/s) = V_{ruedas}(rad/s) \cdot i \quad (18)$$

- *Ic (teórica) (A)*: Recordamos que la *Ic* determinaba la intensidad que circulaba por el motor y se calculaba a través de:

$$Ic(A) = \frac{Vc(V) - K_e \cdot V_{motor}(rad/s)}{R_m} \quad (19)$$

Sin embargo, esta variable está sujeta a una serie de condiciones:

- Si parámetro Reg. = “NO” la *Ic* como mínimo será cero, no menor, ya que no se permite la regeneración.
 - Si parámetro Reg. = “SI” y variable “Freno” < 0 la *Ic* tampoco puede tomar valores negativos. Esto es así ya que, como se verá, la configuración que regula la regeneración es tal que sólo se permite cuando el conductor tiene intención real de frenar, es decir, cuando se pulsa el pedal de freno.
 - Si parámetro Reg. = “SI” y variable “Freno” > 0 la *Ic* puede tomar valores negativos. En este caso, al permitir regeneración y estar pulsado el freno, la *Ic* puede ser negativa, permitiendo actuar el motor como freno y recargando las baterías.
- *Ic real (A)*: El valor real de la intensidad que circulará por el motor no será siempre el valor hallado en el punto anterior. Esto es así porque la intensidad que circula por un motor está limitada por el valor de la máxima corriente que puede circular por él o por la corriente máxima limitada por el controlador. Con esto:

$$-I_{max} \leq I_c(real) \leq I_{max} \quad (20)$$

Así pues, la I_c (real) tomará el valor de la I_c (teórica) mientras esta esté dentro del intervalo anterior y tomará el valor de los extremos cuando la I_c (teórica) sobrepase estos límites.

- *Par motor (N·m)*: Dicho par motor es el par total generado por el motor por acción de la I_c (real). Se calcula mediante la expresión ya vista en apartados anteriores:

$$Par\ motor = K_p \cdot I_c(real) \quad (21)$$

- *Aceleración (m/s^2)*: La aceleración es la variable más importante del simulador ya que nos permite conocer la dinámica del vehículo. Para encontrarla partiremos de la siguiente ecuación:

$$\tau_{motor(útil)} = \frac{\tau_{ruedas}}{i} = \tau_{motor} - \tau_0 - Inercia_{motor} \quad (22)$$

$$\frac{\tau_{ruedas}}{i} = I_c \cdot K_p - \tau_0 - J_m \cdot \alpha_m \quad \alpha_m: \text{aceleración angular motor} \quad (23)$$

$$\frac{\tau_{ruedas}}{i} = I_c \cdot K_p - \tau_0 - J_m \cdot \frac{a_{kart}}{R_r} \cdot i \quad (24)$$

Se ve como esta expresión (24) ya depende casi exclusivamente de los parámetros definidos en el primer bloque o de las variables intermedias ya calculadas. Así, solo nos queda determinar la expresión de τ_{ruedas} en función de estos parámetros y variables. Aplicando la conservación del momento angular en el eje de la rueda resulta:

$$\tau_{ruedas} = (F_{rod} + F_{aer} + m_{kart} \cdot a_{kart}) \cdot R_r + J_r \cdot \alpha_r \quad (25)$$

$$\tau_{ruedas} = (F_{rod} + F_{aer} + m_{kart} \cdot a_{kart}) \cdot R_r + (2 \cdot I_{zzt} + 2 \cdot I_{zzd}) \cdot \frac{a_{kart}}{R_r} \quad (26)$$

Trabajando sobre la expresión (24) y (26) ya se puede aislar a_{kart} para que ésta dependa únicamente de parámetros y variables ya conocidos.

Dicha expresión resulta:

$$a_{kart} = \frac{I_c \cdot K_p - \tau_0 - \frac{(F_r + F_a) \cdot R_r}{i}}{\frac{1}{R_r \cdot i} (J_m \cdot i^2 + m_{kart} \cdot R_r^2 + 2 \cdot (I_{zzt} + I_{zzd}))} \quad (27)$$

- *Velocidad kart (km/h)*: Esto es solo un factor de conversión de la variable velocidad expresada en (m/s) para facilitar la comprensión de las magnitudes de velocidad alcanzadas.

Una vez visto el funcionamiento del simulador general, así como comprendido el significado de cada una de sus variables y parámetros, se puede proseguir con la explicación de los diferentes tipos de análisis realizados a partir de éste.

5.2.2.4. Análisis realizados

En este apartado se detallan los diferentes tipos de análisis realizados a partir del simulador, los cuales ya se detallaron al inicio del capítulo. Como recordatorio, estos consistían en:

- Cálculo del consumo del kart
- Análisis del comportamiento del kart al variar el motor y la relación transmisión
- Experimentar las variaciones en el compartimiento del kart durante la frenada según el tipo de regeneración
- Vuelta al circuito de Salou con el kart diseñado

De cada uno de ellos se argumentará como han sido obtenidos los parámetros, bajo qué condiciones o suposiciones se ha realizado el análisis y se extraerán las conclusiones pertinentes a partir de los datos obtenidos.

Antes de detallar los análisis es importante destacar que hay una serie de parámetros y consideraciones que se mantendrán iguales en todos ellos. Es el caso de:

- C_{rr} (coeficiente rodadura)=0,025 (coeficiente de rodadura típico de la rueda de un kart sobre asfalto)
- C_x (coeficiente resistencia aerodinámica)=0,8⁴
- ρ_a (densidad aire)=1,2 kg/m³
- Paso tiempo simulación: 0,01s (se ha considerado que es un valor suficientemente pequeño para nuestros objetivos)

⁴ Este valor se ha obtenido del estudio "*Evaluation of aerodynamic drag of go kart by means of coast down test and cfd analysis*", realizado por el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Vergata (Roma).

- No se ha considerado freno mecánico: Por la dificultad que presenta medir el efecto real de este sobre el kart, no se ha tenido presente como método de freno en la simulación.
- Eficiencia transmisiones 100%: Dada la alta eficiencia de las transmisiones, éstas se han considerado del 100% para simplificar los cálculos.

5.2.2.4.1 Cálculo del consumo y aceleración del kart

Este análisis se ha realizado sobre el kart conducido en Salou. Muchos de los parámetros no se pudieron determinar en la visita, con lo que para estos se han utilizado valores aproximados a los de la competencia encontrados por internet:

Masa total kart	Área frontal	Radio rueda	Inercia ruedas delanteras	Inercia ruedas traseras	Regeneración
200 kg	0,6 m ²	0,135 m	0,015 kg·m ²	0,027 kg·m ²	NO

Cálculo del consumo

Este análisis será útil para calcular el consumo medio aproximado de los karts al dar una vuelta al circuito. Esto, junto con la especificación de autonomía deseada permitirá dimensionar la capacidad de las baterías.

Para calcularlo, se utilizará el perfil de velocidades, ya visto, de una vuelta al circuito de Salou obtenido mediante la aplicación “My Tracks”. Se variarán los valores de las variables acelerador y del freno en cada instante de tiempo hasta conseguir el mismo perfil en el simulador.

Una vez simulada una vuelta completa, gracias a la variable I_c (real), se es capaz de calcular la intensidad consumida por el kart de Salou durante una vuelta. Este valor resulta ser:

$$I_{cons}(1vuelta)(Ah) = \sum I_c \cdot 0,01(s) \cdot \frac{1h}{3600s} \quad (28)$$

$$I_{cons}(1vuelta)(Ah) = 0,3976 Ah$$

Ahora, sabiendo el consumo aproximado de este tipo de vehículos, se determina un valor aproximado de la capacidad que deberían tener las baterías de nuestro vehículo para lograr la autonomía deseada. Dado que la autonomía deseada para nuestro kart es de 45 minutos,

la capacidad mínima de las baterías deberá ser de:

$$C_{baterias}(Ah) = I_{cons}(1vuelta) \cdot \frac{Autonomía(s)}{Tiempo(1vuelta)(s)} \quad (29)$$

$$C_{baterias}(Ah) = 0,3976 \cdot \frac{45 \cdot 60}{31} = \mathbf{34,5 Ah} \quad (30)$$

Cálculo aceleración

De la misma simulación anterior también se puede extraer el valor máximo de la aceleración del kart en una vuelta al circuito. Esta resulta ser:

$$a_{max} = \mathbf{4,68 m/s^2}$$

5.2.2.4.2 *Análisis del comportamiento del kart al variar el motor y relación transmisión*

Como se ha comentado, el objetivo de este análisis consiste en encontrar el modelo de motor que junto con la relación de transmisión adecuada mejor se ajuste a los requerimientos deseados.

- $V_{max}(min) = 70-50 \text{ km/h}$
- $A_{max}(min) = 6-4 \text{ m/s}^2$

Este análisis se ha realizado sobre un kart cualquiera. Como en el caso anterior, mediante el estudio de la competencia se han asignado valores similares a los parámetros del kart para este estudio. Así pues dicha simulación se realiza sobre un kart con:

Masa total kart	Área frontal	Radio rueda	Inercia ruedas delanteras	Inercia ruedas traseras	Regeneración
200 kg	0,6 m ²	0,138 m	0,015 kg·m ²	0,027 kg·m ²	NO

Se ha simulado el arranque de un kart partiendo del reposo, presionando el pedal del acelerador a fondo hasta alcanzar su velocidad máxima.

Se ha realizado el estudio para los siguientes motores:

Parámetros/Motores	Lynch 200-D135	Lynch 200-D135 RAG	AGNI 143	Motenergy ME0909
I_{max} (A)	400 (limitada a 300 A)	400 (limitada a 300 A)	400 (limitada a 300 A)	400 (limitada a 300 A)
Corriente sin carga (A)	3,5	7,36	4	3,5
Constante velocidad (rev/volt)	45	42	47	93,45
Resistencia armadura (Ω)	0,01675	0,01695	0,024	0,04
Inercia armadura (kg·m²)	0,0236	0,0238	0,024	0,0236
Voltaje nominal (V)	84	96	85	48
Constante de par (N·m/A)	0,185	0,207	0,2031	0,102

Una vez se han obtenido los datos de estas cuatro simulaciones, se ha realizado una gráfica y una tabla comparativa.

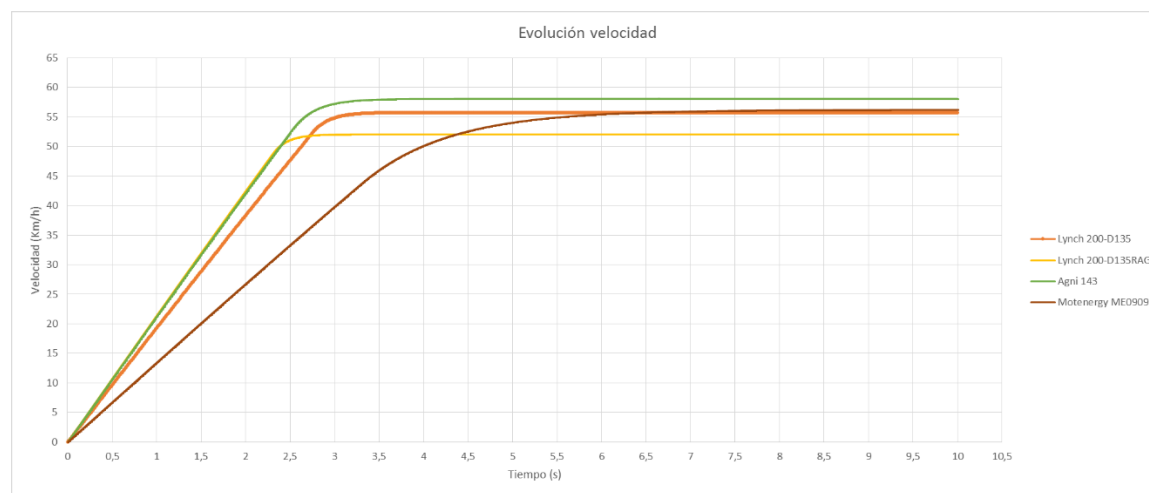


Fig.38: Gráficas velocidad/tiempo de los cuatro modelos analizados

Parámetros/Motores	Lynch 200-D135	Lynch 200-D135 RAG	AGNI 143	Motenergy ME0909
Aceleración máxima (m/s²)	5,37	5,96	5,91	3,74
Velocidad máxima (km/h)	55,75	52,05	58,05	56,21
Relación transmisión necesaria para conseguir requerimientos deseados aproximados	3	3	3	4

Con esto, se puede apreciar como las propiedades de los motores Lynch y AGNI son muy parecidas y son las que mejor se ajustan a nuestros requerimientos, descartando así la opción de la firma Motenergy. Cualquiera de estas tres opciones restantes cumple con los requisitos mínimos fijados en la especificación, por lo que todos serían una opción válida para nuestra solución. La elección final ha sido el **AGNI 143** por ofrecer, en conjunto, unas prestaciones ligeramente superiores al resto.

5.2.2.4.3 Experimental frenada con regeneración

Una parte muy importante que determina el comportamiento del kart es el uso de la regeneración. Desde el punto de vista de consumo y autonomía la presencia de la regeneración es muy positiva. La regeneración disminuirá el consumo neto del kart, aumentando de esta forma, la autonomía del vehículo.

Sin embargo, la existencia de regeneración produce un efecto sobre el frenado, ya que el motor pasa a actuar como generador y por tanto tiende a frenar el vehículo.

Para comprender la magnitud de este efecto sobre la frenada de nuestro kart, se ha realizado el siguiente análisis. Éste consistente en:

1. Acelerar nuestro kart hasta alcanzar su velocidad máxima.
2. Disminuir la velocidad de éste hasta prácticamente el reposo mediante:
 - a. Frenada regenerativa: Permitiendo la regeneración y por tanto la acción del motor como freno.
 - b. Frenada natural: Disminución de la velocidad por efecto únicamente de las fuerzas opuestas al avance del vehículo.

Una vez realizado el análisis los datos obtenidos se resumen en la siguiente gráfica:

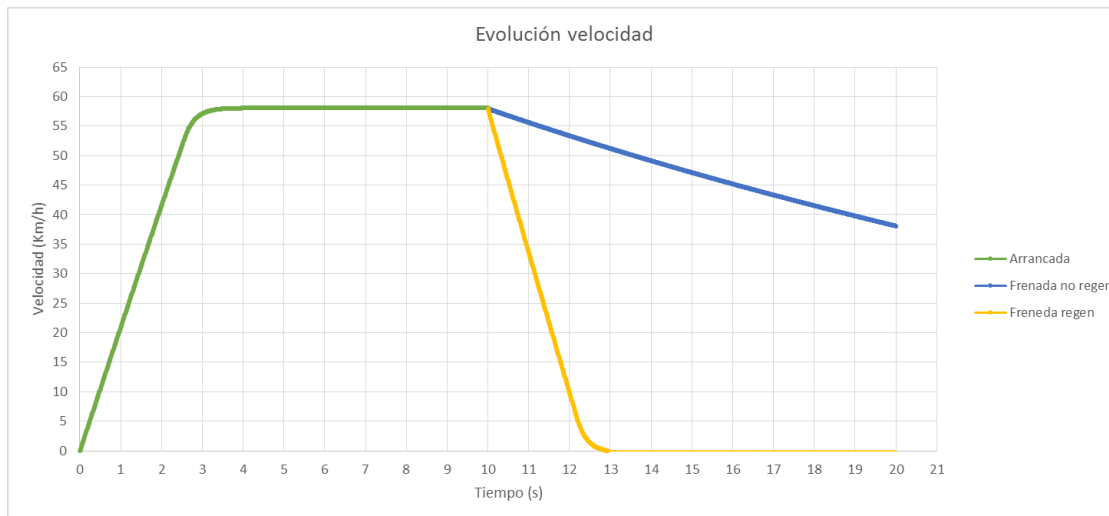


Fig.39: Gráfica velocidad/tiempo. Se muestra: arranque (verde), frenada con regeneración (amarillo) y frenada sin regeneración (azul)

En el gráfico anterior, se puede apreciar como el motor produce un efecto muy importante sobre la frenada cuando se permite la regeneración.

En la visita al karting, los expertos nos dijeron que la conducción óptima para los karts es aquella donde se consigue tomar las curvas sin frenar bruscamente ya que de lo contrario el kart derrapa.

Por este motivo, se ha determinado que no interesa aplicar regeneración al kart cuando simplemente se deje de presionar el pedal del acelerador, ya que el kart frenaría en exceso. Se configurará la regeneración de tal manera que esta solo se active cuando haya una intención real de disminuir la velocidad considerablemente, es decir, cuando el piloto presione el pedal del freno.

5.2.2.4.4 Vuelta al circuito de Salou con el kart diseñado

Una vez dimensionado nuestro kart, se someterá éste al mismo tipo de trazado y se mirará, en primer lugar, cuál sería el tiempo por vuelta aproximado. Para hacer esto, solo se ha contemplado que habrá diferencias significativas de tiempo entre ésta y la vuelta realizada por el kart de Salou en las rectas (tiempo que el acelerador esta pisado a fondo, la velocidad en las curvas se ha determinado que dependerá mayormente de la habilidad del piloto).

El proceso seguido para determinar estos tiempos ha sido el siguiente:

1. Se ha calculado, mediante el grafico velocidad/tiempo, la longitud de los tres tramos rectos del circuito.

Recta	Longitud
1	32 m
2	48 m
3	70 m

2. Se ha determinado, mediante el simulador, el tiempo que tardaría nuestro kart en recorrer estas longitudes (partiendo de la velocidad inicial pertinente).

Recta	Tiempo
1	2,34
2	3,38
3	4,79

3. Con esto se puede estimar que el tiempo aproximado por vuelta sería de unos:

$$\mathbf{T_{tiempo_{vuelta} = 26,51\ segons}}$$

En segundo lugar, aprovechando la misma simulación, se ha determinado la intensidad consumida durante una vuelta completa. Esto permitirá comprobar si con el dimensionamiento de las baterías realizado se cumplirá realmente la especificación de autonomía.

En primer lugar, se calculará, únicamente, la intensidad consumida de las baterías al motor.

$$I_{cons}(1vuelta)(Ah) = 0,465\ Ah$$

Con este consumo, la autonomía del kart ya se encontraría dentro de los límites especificados, ya que:

$$Autonomía(min) = \frac{Capacidad\ baterías(Ah)}{I_{cons}(1vuelta)(Ah)} \cdot \frac{T_{tiempo\ vuelta(s)}}{60} \quad (31)$$

$$Autonomía(\text{min}) = \frac{40}{0,465} \cdot \frac{26,51}{60} = \mathbf{38 \text{ min}}$$

Aun así, hay que tener en cuenta que nuestro modelo dispone de regeneración. Es difícil dar un valor concreto del aporte de energía a las baterías proveniente de la regeneración. Esto es debido a la falta de datos como: efecto del freno mecánico sobre la frenada o la eficiencia del proceso de regeneración.

A pesar de esto, se estima que, con nuestra configuración de la regeneración, se llegarían a superar los 45 min de autonomía deseada. De esta forma nuestro kart mejoraría tanto los tiempos/vuelta como la autonomía del kart de Salou.

6. ESTUDIO ECONÓMICO

Al contemplar el caso de una ingeniería a la que se le asigna el diseño conceptual de un prototipo, el estudio económico consistirá fundamentalmente en la facturación de nuestra ingeniería al cliente en concepto de: horas trabajadas, posibles gastos en dietas y compra de normativa o software.

De esta forma, se presenta dicha factura, dónde se detallarán:

- Horas de ingeniería: Se desglosarán todas las horas dedicadas en subgrupos según la tarea realizada. Se detallará también el precio por hora facturado por cada una de ellas, así como el coste final de cada uno de los conceptos.
- Otros conceptos: Se detallará el precio dedicado a la visita al Karting de Salou, ya que, para la parte eléctrica no se ha requerido normativa de pago ni el uso de software especializado.

HORAS DE INGENIERÍA				
Concepto		Horas	Precio/hora	Coste total
Búsqueda de información general		25	30 €	750 €
Análisis de mercado		15	30 €	450 €
Búsqueda y análisis de información especializada		50	50 €	2500 €
Diseño de la solución		30	70 €	2100 €
Modelo de simulación		35	70 €	2450 €
Redacción del informe		60	30 €	1800 €
Reuniones		15	30 €	450 €
Trabajo de campo (visitas)		10	80 €	800 €
HORAS DE INGENIERÍA		240	-	11.300 €
OTROS				
Concepto			Coste total	
	Trayecto		60 €	
Visita karting Salou	Material de medición		50 €	
	Tandas realizadas		40 €	
OTROS			150 €	
TOTAL			11.450 €	

Aunque el proyecto solo consistía en el diseño conceptual, no en su construcción, a continuación se detalla el coste que se derivaría al tratar de implementar la instalación eléctrica del prototipo.

A continuación se presenta este coste. Fundamentalmente, se detalla el precio de cada uno de los componentes ya que no se ha tenido en cuenta el coste de la mano de obra.

COSTE INSTALACIÓN ELÉCTRICA PROTOTIPO			
Concepto	Ud.	Precio/unidad	Coste total
Motor (AGNI 143)	1	1600 €	1600 €
Celda batería (CALB BAT-CA040FI)	24	67,3 €	1608 €
BMS (EV Power BCU-PEV-2.x)	Módulos celda	24	12 €
	Unidad control	1	393 €
Controlador (KELLY KDZ72401)	1	345 €	345 €
Cargador (EV POWER POW72V35A/BMS)	1	520 €	520 €
Pedales (-5K Throttle Pedal)	2	72 €	144 €
Relés (KELLY ZJW 12VDC Coils 400Amps)	3	63 €	189 €
Fusibles (ANL-350 EATON)	1	50 €	50 €
Convertidor DC/DC (TracoPower TMR 6-4822WI)	1	18 €	18€
TOTAL			5.155 €

7. IMPACTO AMBIENTAL

Cada vez más, se está extendiendo alrededor del mundo la preocupación sobre el impacto de la sociedad sobre el medio ambiente. Por este motivo, se busca que los productos actuales sean lo máximo de respetuosos y afecten lo menos posible a éste.

Con esta premisa, se decidió diseñar un kart eléctrico que no tuviera ningún producto tóxico o potencialmente peligroso para el medio ambiente. Aun así, la fabricación y utilización de este kart no estará exenta de emisiones de productos contaminantes a la atmosfera, ni de producción de productos radioactivos.

Esto es así fundamentalmente por dos motivos, los cuales no están a nuestro alcance controlar:

- Emisiones en la fabricación y transporte de componentes: Durante el proceso de fabricación y el transporte de los componentes, se generaran presumiblemente emisiones de CO₂ y otros productos contaminantes. Estas emisiones son difícilmente cuantificables.
- Impacto ambiental durante la utilización de los karts: Aun siendo karts que utilizan como fuente de energía la electricidad, la producción de esta genera aún hoy en día emisiones y productos contaminantes para el medio ambiente. Esto es así porque, en España, la mayor parte de la energía eléctrica generada no proviene de fuentes renovables.

El grupo WWF realiza, cada mes, un estudio sobre las emisiones de productos contaminantes por kWh de energía eléctrica generado. Del estudio de Mayo de 2015 se extrae la siguiente información.

Como en el caso del Ah, el kWh no es una unidad el sistema internacional. En este caso la unidad del sistema internacional equivalente es el Joule.

Producto	Cantidad (g/kWh)
Dióxido de carbono (CO₂)	170
Dióxido de azufre (SO₂)	0,380
Óxidos de nitrógeno (NO_x)	0,263
Residuos radiactivos	0,236·10 ⁻³

El consumo máximo (sin regeneración) del kart durante una vuelta son 0,033 kWh y una vuelta son aproximadamente 300 m. Con esto se puede estimar que por cada kilómetro se consumen 0,11 kWh/km. Finalmente, sabiendo que la emisión de CO₂ por kWh generado són 170 g/kWh, la emisión indirecta de CO₂ que supondría el uso del kart sería de 18,7 g/km.

Para poder concluir que el kart eléctrico es realmente una alternativa sostenible, habría que comparar este último valor encontrado con las emisiones de un kart de combustión de prestaciones similares. (No ha sido posible hallar este dato)

Otro posible efecto, muchas veces no contemplado, es el efecto el ruido. Aquí, nuestro kart también aporta una gran ventaja sobre los karts impulsados por motores de combustión. Dado la falta de insonorización en los karts, el ruido del motor no se ve amortiguado de ninguna manera. De diversos estudios⁵, se determina que:

Tipo	Decibelios
Kart combustión	80-90 dB
Kart eléctrico	60-70 dB

Teniendo en cuenta que la escala del dB es logarítmica y que aproximadamente un aumento de 3 dB en esta escala equivale al doble de ruido, se puede tener una idea de la gran diferencia entre unos y otros.

⁵ Estudios: “análisis de ruidos de motores eléctricos aplicando intensimetría sonora”, Universidad Córdoba

“noise impact assessment”, realizado por un karting de EE.UU

8. Planificación

Aquí se presenta, mediante un diagrama de Gantt, la planificación de las tareas realizadas durante el proyecto, así como la duración de cada una de ellas.

	Febrero '15			Marzo '15			Abril '15			Mayo '15			Junio '15			Julio '15			Agosto '15			Septiembre '15							
Tarea / Semana	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15	S-16	S-17	S-18	S-19	S-20	S-21	S-22	S-23	S-24	S-25	S-26	S-27	S-28	S-29
Inicio proyecto																													
Búsqueda información																													
Estado del arte																													
Búsqueda información general																													
Búsqueda información especializada																													
Realización y análisis simulador																													
Comprensión ecuaciones vehículo																													
Confección modelo simulación																													
Análisis simulación																													
Solución y redacción memoria																													
Diseño conceptual solución																													
Estudio económico																													
Impacto ambiental																													
Redacción proyecto																													
Presentación proyecto																													
Fin proyecto																													

Conclusiones

Tras 28 semanas de trabajo se ha finalizado el proyecto. Durante el transcurso de éstas se ha trabajado para intentar resolver el problema que se nos planteaba, el diseño de la instalación eléctrica de un kart eléctrico.

Para esto, ha sido necesario poner en práctica no solo los conocimientos adquiridos previamente sino otra clase de capacidades como: buscar información de manera eficiente, comprender y analizar críticamente esta información, valorar y escoger aquella solución óptima y sintetizar información compleja para hacerla entendible para personas no especializadas en la materia. Todas ellas, capacidades que se le exigen a un ingeniero en su día a día.

Aunque se ha conseguido completar con éxito los objetivos que se marcaban al inicio de éste, debido al reducido tiempo y a la presencia de otros compromisos académicos, no se ha podido profundizar en la temática, proponiendo, por ejemplo, mejoras en alguno de los componentes actuales presentes en la instalación eléctrica. Con esto, se podría proponer un estudio posterior tratando este tipo de mejoras y a su vez, abordando esos temas que se dejaron fuera del alcance de este proyecto: valoración del coste real de fabricación del producto y la realización de un plan de industrialización y comercialización.

Al finalizar el proyecto, se ha valorado positivamente esta experiencia al permitir, a diferencia de otros trabajos en la carrera, enfrentarse solo a la resolución de un problema extenso y complejo. Además, como ya se ha comentado, ha servido para trabajar paralelamente con un compañero y amigo con el que se ha podido discutir sobre uno de los temas de mayor interés para ambos dentro de la ingeniería, la automoción.

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutor Emilio Angulo el interés y la predisposición que ha mostrado en todo momento hacia nosotros y el proyecto. La tutorización periódica y la explicación de esos conceptos más complejos han servido para lograr completar y entender este proyecto a la perfección.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a toda la gente del “Electric Karting Salou” la ayuda recibida durante la visita. En todo momento fueron muy amables y mostraron mucho interés por ayudarnos a resolver todas esas dudas que se nos planteaban.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] [<http://www.sodikartuk.com/Karts/RTX>, Agosto 2015]
- [2] [<http://curva1kart.com.ar/noticias/?p=29703>, Agosto 2015]
- [3] [<http://www.rimo-germany.com/sinus-ion.html>]
- [4] [<http://www.bizkarts.com/new-karts/electric-karts/ecovolt-ng/>, Agosto 2015]
- [5] [<https://glennhomej.wordpress.com/tag/motor-electrico>, Agosto 2015]
- [6] [<http://tecnologiaautomatismos.es.tl/Motores-El-e2-ctricos.htm>, Agosto 2015]
- [7] [<http://www.agnimotors.com>, Junio 2015]
- [8] [<http://www.motenergy.com/me0909.html>, Agosto 2015]
- [9] [<http://www.mpptsolar.com/es/baterias-serie-paralelo.html>, Agosto 2015]
- [10] [<http://ev-power.com.au/webstore/index.php>, Agosto 2015]
- [11] [<http://www.orionbms.com>, Agosto 2015]
- [12] [<http://www.rimac-automobili.com/products-and-services/battery-systems-and-bms-27>, Agosto 2015]
- [13] [*GESTOR DE CARGA DE BATERÍAS (BMS)*], Gabriel Huerta Illera, Julio 2014]
- [14] [<http://kellycontroller.com/products.php>, Agosto 2015]
- [15] [<http://www.electricmotorsport.com/alltrax-spm-72400-24-72v-400a.html>, Agosto 2015]
- [16] [<http://www.manzanitamicro.com/products>, Agosto 2015]
- [17] [<http://www.ev-power.eu>, Agosto 2014]
- [18] [<http://www.radioelectronica.es>, Agosto 2015]
- [19] [<http://www.digikey.com/product-detail/en/ANL-350/ANL-350-ND/1645094>, Agosto 2015]

[20] [<http://www.tracopower.com/home>, Agosto 2015]

Bibliografía complementaria

Fabricantes karts eléctricos

[<http://otlkart.es/go-kart/serie-storm.html>, Agosto 2015]

[<http://www.ekc-karts.com/es/tkarts>, Agosto 2015]

[<http://speed-2-max.fr>, Agosto 2015]

[<http://www.carolimotor.com/stinger-electric>, Agosto 2015]

[<http://www.tomkart.com/en>, Agosto 2015]

Legislación

[<http://www.rfeda.es/tecnica/reglamentos.asp>, Agosto 2015]

[[http://www.fia.com/sport/regulations?f\[0\]=field_regulation_category%3A75](http://www.fia.com/sport/regulations?f[0]=field_regulation_category%3A75), Agosto 2015]

Componentes

[<http://www.tenergy.com>, Agosto 2015]

[<http://www.asmokarts.com/index.cfm?pageID=66>, Agosto 2015]

[<http://www.ebaracus.com/product-category/kelly>, Agosto 2015]

[http://www.kartelec.com/f/sp_oem.htm, Agosto 2015]

[<http://www.eaton.com/Eaton/index.htm>, Agosto 2015]

Teoría funcionamiento karts eléctricos

[<http://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html>, Agosto 2015]

[*“Adaptación de un kart convencional a propulsión alternativa”*, Xavier Bassons Castellà, 2011]

[*Apuntes académicos asignatura “Electrónica”*, Miquel Balsells Luquin, 2013-2014 Q2]

Otros

[http://www.wwf.es/que_hacemos/cambio_climatico/nuestras_soluciones/energias_renovables/observatorio_de_la_electricidad, Agosto 2015]

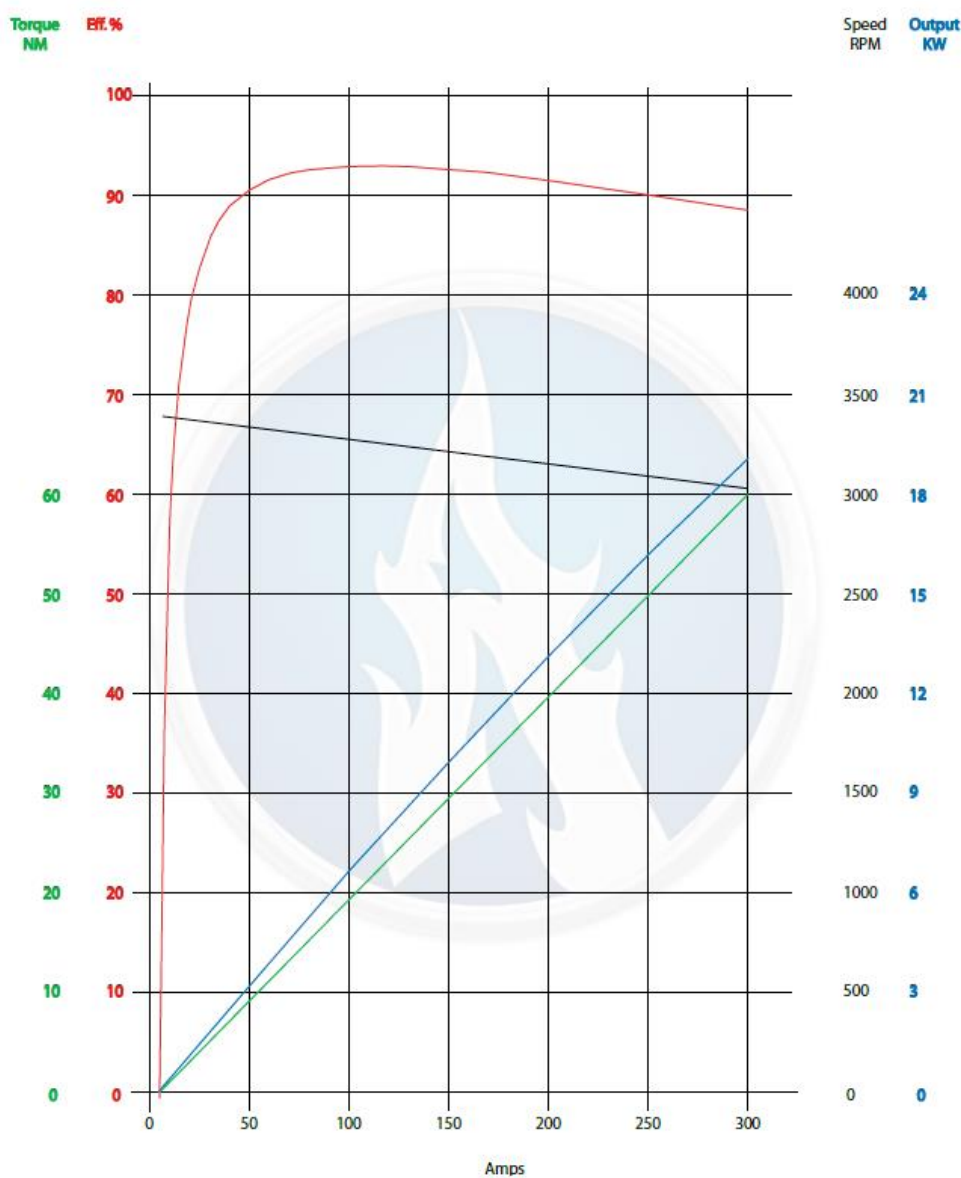
[“*Evaluation of aerodynamic drag of go kart by means of coast down test and cfd analysis*”, Marco Evangelos Biancoli, Department of Mechanical Engineering Tor Vergata University, Rome Italy]

[<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/4312/4238>, Agosto 2015]

ANEXOS

A.1 Curva funcionamiento motor

47RPM/VOLT AT 72V



A.2 Especificaciones BMS

A.2.1 Módulos de celda



EV Power Australia Pty Ltd

LFP ANALOG CELL BALANCING and MONITORING MODULES

Version 8

EV power V8 cell balancing monitoring modules combine simplicity and reliability to maintain Lithium LFP (LiFePO₄) cell balance and protection.

The cell modules are designed to connect directly on top of prismatic LFP cells of 40-400Ah capacity. They can operate as standalone cell balancers or as part of a larger distributed battery management system. They can be daisy chained together using the proprietary one wire current loop signal interface which is normally closed if all the cells are within safe operating voltage limits and open circuit otherwise. This can be used to control chargers and loads or to interface with an EV Power master unit.

A cell module regulates the cell to which it is attached when the voltage reaches 3.6V. This is done by shunt regulation up to 1000mA. It allows unbalanced cells in a battery to even out during charging when a suitable charger is used.

The system is designed to be failsafe. In order to operate the cell modules require a cell voltage within the recommended limits. An internal fuse protects against over-voltage and cell module failure.

V8 Cell Module Specifications

Nominal Cell Voltage:	3.2-3.4V
Bypass Voltage:	3.60V (Bypass shunt will switch on)
Max. Bypass Current:	1000mA
Weight:	10g
Power Consumption:	< 2.5mA @ 3.2V, variance +/- 0.15 mA (<0.1Ah / month)
LED Indicators:	Green (ON=OK), Red(ON=Bypass active)
Safety Limits:	2.6V < OK < 4.0V
Current Loop Relay:	Normally closed when cell voltage is within the safety limits.
Max Signal current:	100mA (non-polarized) maximum
Max height above terminal bolts:	zero
Environmental:	Epoxy encapsulated against dust and moisture ingress. Gold plated negative terminal

Standard sizes available for CALB cells.

A.2.2 Unidad de control

BCU-PEV-2.X

MANUAL

1.0

This PEV-2.x battery control unit is designed for applications that use Lithium batteries where specific information about the battery's voltage, current and state of charge is required. This may include electric vehicles and solar power systems.

The unit is designed to directly control the EV Power range of PFC chargers with the correct charge curve. It has no internal contactor to directly disconnect the battery but it does have a 12V relay output to drive an external (non-latching) relay.

The BCU works in conjunction with EV Power LFP Cell Modules to perform comprehensive protection, monitoring and user feedback of key battery information.

Key Features:

- Dash mount 2 line OLED display unit. Displays Volts, Amps, Amphours and % SOC
- BCU is powered directly from the battery (12V, 24V, 36V, 48V, 60V, or 90-350VDC). Voltage range must be specified at purchase.
- External hall effect current sensor. No contact with HV cabling.
- Enclosed flange mount polycarbonate box, IP54 rated against dust and splashing water.
- Automatic battery capacity calibration
- 0-5V external fuel gauge output (fuel gauge not supplied)
- External contactor driver, up to 2A coil current
- Direct charge control for up to three PFC chargers. No CAN bus required.
- Alternator (fast charge) enable output voltage free contact.
- Current limit feature to prevent excessive discharge currents.
- Complete Package includes BCU enclosure, external monitor display and current sensor
- Self calibrating battery capacity calculations.
- Internal alarm buzzer for audible warning.
- Simple to understand and install.
- Low power requirement
- Reduced overall cost for instrumentation as no external Ah meters are required
- Designed and manufactured in Australia

At order time the following information is required:

- Number and type of cells in the battery (4-100 cells) 312V nominal maximum.
- Amp-hour capacity of the battery pack (40-1000Ah)
- Expected max current draw for current limiting (300A max continuous current)
- Is charge interlock required to prevent discharge when charger is attached? (eg an EV)
- Is the PFC charger external enable control?
- External generator or fast charger start SOC% and stop SOC%
OR low SOC warning indicator level.



Read these instructions several times before commencing installation.

BCU-PEV Specifications

SPECIFICATIONS		
BCU-PEV-HV	MIN	MAX
Power Input (VDC), Note: 12VDC input option available for higher or lower voltages.	12	350
Power Consumption (W)	1	5
Cell Modules monitored	0	100
Weight (g) without accessories	550	
Dimensions, 205 x 125 x 56mm		
Volts resolution	±1	
Amps resolution	±1	
Ah resolution	±1	
%SOC resolution	±1	
Amps range, Note: current may be higher but will be measured as maximum 300A	-300	+300
Volts Range	0	350
Amphour Range	0	-1000
Battery temperature warning level (internal PTC thermistor)	70°C	
State of Charge Range %	0	100
State of Charge output (Volts)	0	4.8

Objective of this manual

This manual will help with installation and operation of the battery control unit in conjunction with EV Power cell balancing modules.

An understanding of electrical principles and competence with electrical tools is required. Ability to use the volts, amps and Ohms setting of a multimeter is a prerequisite.

Disclaimer

This is a guide only. Potentially lethal voltages and currents are involved when working with batteries. It is the responsibility of the installer to have the appropriate qualifications and skills for working with high voltages. No liability whatsoever will be assumed by EV Power for injury, accidents or damage resulting from the use of these instructions or any EV Power supplied components.

- 9) Has an optional charger interlock input to prevent motor operation while a charger is connected.
- 10) Provides a 0-5V output to drive an external fuel level (SOC) meter.

Power Supply Choices

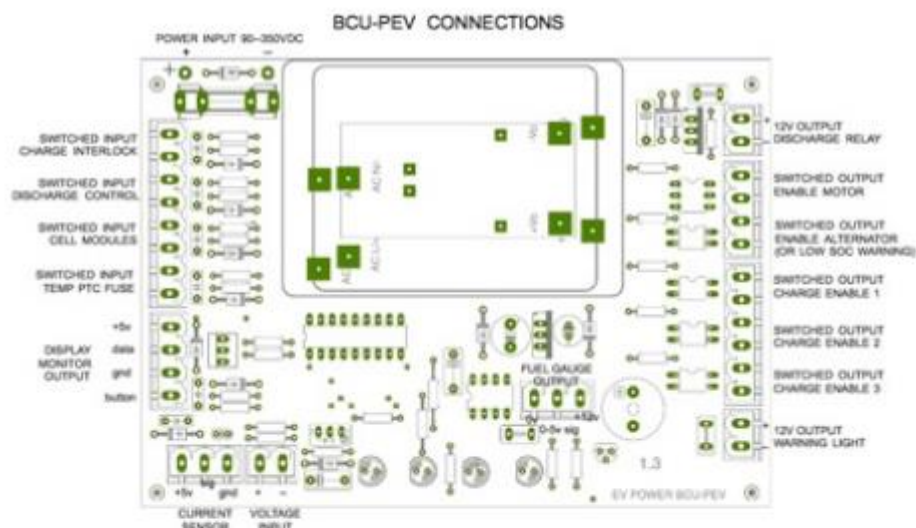
The BCU can be powered directly from the battery pack itself. This means that it does not necessarily require an external 12V supply, although this is also an option.

There are four choices of internal power supply:

- 1) 9 - 18VDC - 12V Nominal (~4 cells)
- 2) 18 - 36VDC - 24V Nominal (~8 cells)
- 3) 36 - 72VDC - 48V Nominal (~16 cells)
- 4) 90 - 350VDC - 96 - 312V Nominal (30 - 96 cells)

For reliable operation outside these voltage ranges choose the 12V supply and use a 12V auxiliary battery for the BCU power supply.

For 12V powered BCU only the voltage sense cable should be connected to the battery positive and negative via a 500mA fuse away from any traction cables.



Description of connections:

- 1) Power Supply Input as specified at order - This is the DC power to the BCU. The BCU-PEV has an internal power supply to step down the battery pack voltage to isolated 12VDC which is used for the controllers internal functions. It is designed for connection directly to the battery it is controlling.

This has the advantage of safety, not mixing external 12V supply with battery HV lines. It also means the BCU can be used without any other external peripherals or auxiliary batteries.

A.3 Especificación controlador Kelly

Kelly KDZ Series/PM/Sep-Ex Motor Controller User's Manual

V 3.3

Chapter 2 Main Features and Specifications

2.1 General functions

- (1) Extended fault detection and protection. The LED flashing pattern indicates the fault sources.
- (2) Monitoring battery voltage. It will stop driving if the battery voltage is too high and it will progressively cut back motor drive power as battery voltage drops until it cuts out altogether at the preset "Low Battery Voltage" setting.
- (3) Built-in current loop and over current protection.
- (4) Configurable motor temperature protection range.
- (5) Current cutback at low temperature and high temperature to protect battery and controller. The current begins to ramp down at 90 °C case temperature, shutting down at 100 °C.
- (6) The controller keeps monitoring battery recharging voltage during regenerative braking, progressively cutting back current as battery voltage rises then cutting off regen altogether when voltage goes too high.
- (7) Maximum reverse speed is configurable to half of the maximum forward speed.
- (8) Configurable and programmable with a host computer through RS232 or USB. Provide free GUI which can run on Windows XP/2000, Windows 7 and Vista (recommend using Kelly Standard USB To RS232 Converter).
- (9) Provision of a +5 volt output to supply various kinds of sensors, including Hall effect type.
- (10) Multifunctional and configurable 3 switch inputs: brake switch, reversing switch, throttle or forward switch. Active low.
- (11) 3 analog 0-5V inputs that default to throttle input, brake input and motor temperature input.
- (12) Pulsed reverse alarm output.
- (13) Maximum reverse power is configurable to half power.
- (14) Configurable motor over-temperature detection and protection with the recommended thermistor KTY84-130.
- (15) Optional 12V output power which can only be applied for Switch signals or LED. Any heavy load is inhibited.

Caution! *Regeneration has braking effect but does not replace the function of a mechanical brake. A mechanical brake is required to stop your vehicle. Regen IS NOT a safety feature! Controller may stop regen, without warning, to protect itself or the battery(it won't protect you!).*

2.2 Features

- Intelligence with powerful microprocessor.
- Synchronous rectification, ultra low drop, and fast PWM to achieve very high efficiency.
- Voltage monitoring on voltage source 12V and 5V.
- Hardware over current protection.
- Hardware over voltage protection.
- Current limit and torque control.

- Low EMC.
- LED fault code.
- Battery protection: current cutback, warning and shutdown at configurable high and low battery voltage.
- Rugged aluminum housing for maximum heat dissipation and harsh environment.
- Rugged high current terminals, and rugged aviation connectors for small signal.
- Thermal protection: current cut back, warning and shutdown at high temperature.
- Configurable Current-Mode or Voltage-Mode when Field Switch is enabled, to achieve higher safety and reliability.
- Configurable high pedal protection: the controller will not work if high throttle is detected at power on.
- Brake switch is used to start regen.
- 0-5V or 0-5K brake signal is used to command regen current.
- Capable of detecting short-circuit fault in the main contactor at power on.
- Easy installation: 1-4V "Hall Active" throttle, or 0-5K or 0-5V potentiometer(<100K) can work.
- Standard PC/Laptop computer is used to do programming. No special tools needed.
- User program provided. Easy to use. No cost to customers.

2.3 Specifications

- Frequency of Operation: 16.6kHz.
- Standby Battery Current: < 0.5mA.
- Controller power supply current, PWR, <150mA.
- Configurable battery voltage range, B+. Max operating range: 8V to 136V
- Standard Throttle Input: 0-5K(2-wire resistive pot), 0-5V (3-wire resistive pot), 1-4V (hall active throttle).
- Analog Brake and Throttle Input: 0-5V or 0-5K.
- Reverse Alarm, Main Contactor Coil Driver, Meter.
- Full Power Temperature Range: 0 °C to 50 °C (controller case temperature).
- Operating Temperature Range: -30 °C to 90 °C, 100 °C shutdown (controller case temperature).
- Motor Current Limit, 1 minutes: 200A-650A, depending on the model.
- Motor Current Limit, continuous:80A-260A, depending on the model.

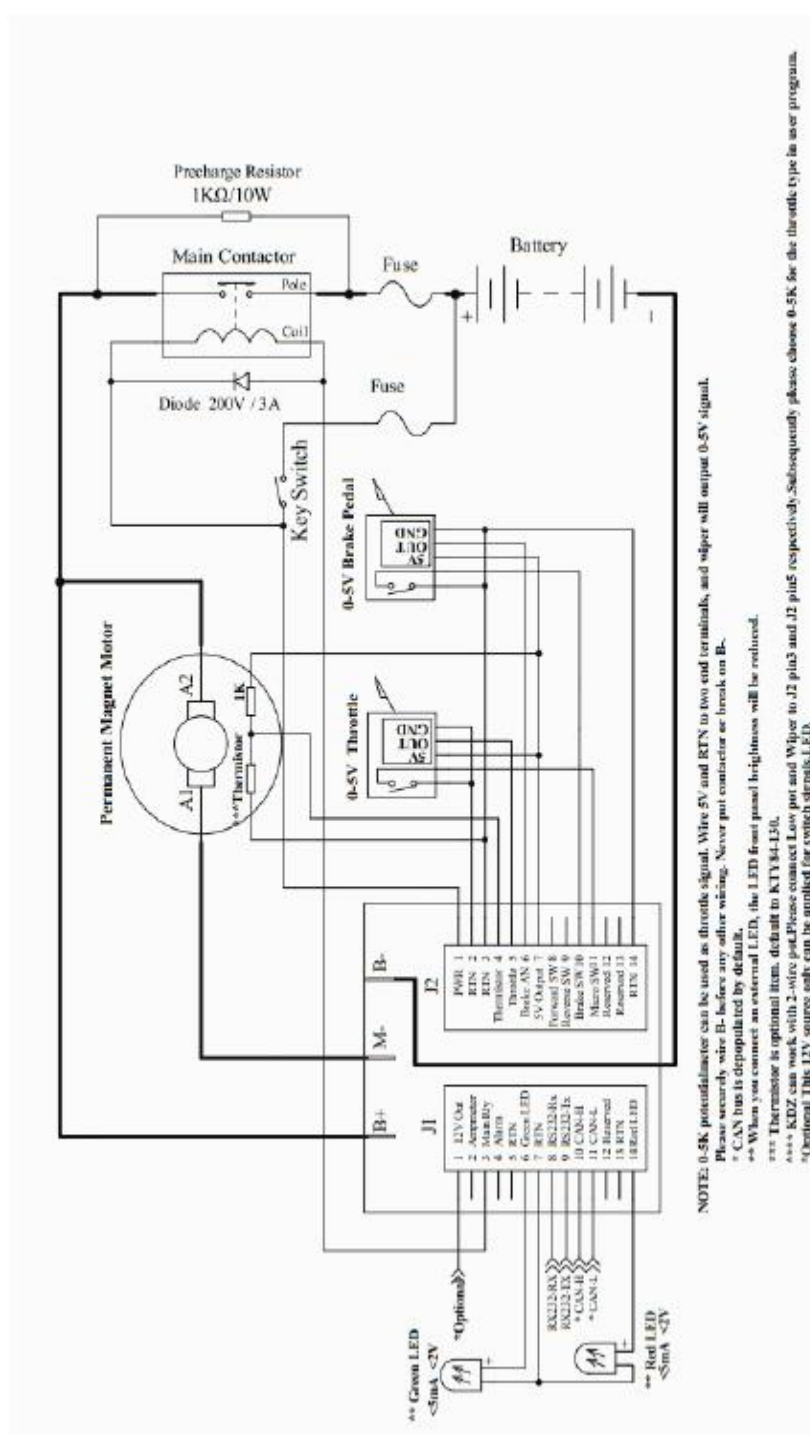


Figure 7: KDZ PM motor controller standard wiring without Reversing Contactor

A.4 Especificación Convertidor DC-DC TMR 6-4822WI

**TRACO
POWER**

DC/DC Converters
TMR 6WI Series 6 Watt

Input Specifications

Input current at no load (nominal input voltage)	24 V models: 6 mA typ. 48 V models: 6 mA typ.
Surge voltage (100 msec. max.)	24 V models: 50 V max. 48 V models: 100 V max.
Input filter	capacitor type (application note for compliance to EN 55022 class A/B pending)
Recommended input fuse (normal blow, max. rating)	24 V models: 700 mA 48 V models: 315 mA
ESD (electrostatic discharge)	EN 61000-4-2, air ± 8 kV, contact ± 6 kV, perf. criteria A
Radiated immunity	EN 61000-4-3, 10 V/m, perf. criteria A
Fast transient / surge (with external input capacitor)	EN 61000-4-4, ± 2 kV, perf. criteria A EN 61000-4-5, ± 2 kV perf. criteria A
– external input capacitor	5 Vin models: Nippon chemi-con KY 330 μ F, 50 V, ESR 55 mOhm other models: Nippon chemi-con KY 220 μ F, 100 V, ESR 48 mOhm
Conducted immunity	EN 61000-4-6, 10 Vrms, perf. criteria A

Output Specifications

Voltage set accuracy	± 1 % max
Regulation	– Input variation Vin min. to Vin max. 0.2 % max. – Load variation 0 – 100% single output models: 0.5 % max. – Load cross regulation 25/100% dual output models: 1.0 % max. balanced load 5.0 % max. (dual output models)
Minimum load	no minimum load required
Ripple and noise (20 MHz Bandwidth)	125 mVpk-pk max.
Transient response settling time (25% load step change)	250 μ s typ.
Short circuit protection	indefinite, automatic recovery
Start up time	– Power On 30 ms typ. – Remote On 30 ms typ.
Capacitive load	3.3 VDC output models: 4700 μ F max. 5 VDC output models: 2200 μ F max. 9 VDC output models: 1400 μ F max. 12 VDC output models: 1100 μ F max. 15 VDC output models: 1000 μ F max. 24 VDC output models: 470 μ F max. ± 5 VDC output models: ± 1400 μ F max. ± 12 VDC output models: ± 660 μ F max. ± 15 VDC output models: ± 470 μ F max.

General Specifications

Temperature ranges	– Operating –40°C to +71°C (without derating) – Case temperature +100°C max. – Storage –55°C to +125°C
Load derating	3.45 %/K above 71°C
Thermal shock, mechanical shock & vibration	EN 61373, MIL-STD-810F – Test conditions www.tracopower.com/products/mil810.pdf
Humidity (non condensing)	95 % rel. H max.
Temperature coefficient	± 0.02 %/K

All specifications valid at nominal input voltage, full load and +25°C after warm-up time unless otherwise stated.

A.5 Diagrama instalación eléctrica

